

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra tváření materiálu

ROZBOR TECHNOLOGIE KOVÁNÍ KRUHOVÝCH DESEK

ANALYSIS OF FORGING TECHNOLOGY CIRCULAR PLATES

Diplomová práce

Autor:

Bc. Petr Aujezdecký

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.

Ostrava 2015

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Aujezdecký**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T034 Technologie tváření a úpravy materiálu
Téma: Rozbor technologie kování kruhových desek
Analysis of forging technology circular plates

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Rešerše postupů volného kování velkých kruhových desek
3. Matematická simulace postupu kování desek
4. Stanovení velikosti deformace a napětí ve vybraných místech výkovků
5. Výběr velikosti deformace a napětí ve vybraných místech výkovků
6. Vyhodnocení experimentů a rozbor dosažených výsledků
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ZUNA, P., SOBOTOVÁ, J., HORNÍK, J. aj. Ovlivnění struktury výkovků z oceli typu C35E podmínkami kovářského zpracování. *Kovárenství*, 2009, č. 36, s. 15-17.
[2] GREGER, M., LÁSZLÓ, V., JÍLEK, L. Rozbor technologie kování velkých kruhových desek. *Kovárenství*, 2013, č. 48, s. 19-23.
[3] KRACÍK, A., JANDOŠ, F. aj. Trhliny ve vycezeninách na pozadí obsahu vodíku. *Acta Metallurgica Slovaca, Metallography* 2007, s. 25-32.
[4] HORNÍK, J., ZUNA, P., DYTRT, K. aj. Výzkum svařitelnosti vad při mezních podmínkách tváření. *Kovárenství*, 2009, č. 36, s. 12-14.
[5] GREGER, M., PETRŽELA, J., LÁZLÓ, V. aj. Development of technology for forging of bottoms of pressure vessels for nuclear power plants. *METAL 2011*, CD ROM.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Miroslav Greger, CSc.**

Konzultant diplomové práce: Ing. Vladimír László, Ph.D.

Datum zadání: 28.11.2014

Datum odevzdání: 20.04.2015



prof. Ing. Jiří Klíber, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|----------------------------------------------|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah DP |
| 2. Originál zadání DP | 7. Textová část DP |
| 3. Zásady pro vypracování DP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání DP student obdrží na své oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za originálem zadání DP. („Zásady pro vypracování diplomové práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah DP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. cca 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 8) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování diplomové práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2014/2015.

Ostrava 4. 11. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě ..12.5.2015.....

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Miroslavu Gregerovi, CSc. za ochotu a vedení mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval rodině a mým blízkým za podporu během celého studia.

Diplomová práce byla vypracována za podpory projektu SP2015/89 Fyzikální simulace tváření pomocí plastometrických testů a laboratorního válcování.

Abstrakt:

Tato diplomová práce se zabývá rozбором možnými technologiemi výroby velkorozměrných kruhových desek pomocí technologie volného kování. Porovnává způsoby měření ploch necelistvostí za použití klasické technologie pēchování pomocí rovných desek a nové technologie pēchování pomocí vypuklých desek, které byly experimentálně ověřeny na vzorcích.

Klíčová slova:

Volné kování, kovářský ingot, kruhová deska, pēchování

Abstract:

This thesis deals with analysis of possible technology large-scale circular plates using forging technology. Compares the methods for measuring surface imperfections using conventional upsetting technology with straight panels and new technologies upsetting through convex panels that were experimentally verified on samples.

Keywords:

Forging, forging ingot, circular plate, upsetting

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Kruhové desky.....	11
3. Kovářenské ingoty a jejich jakost	11
4. Výroba kruhových desek.....	13
4.1 Kování kruhových desek úzkým kovádlem na podložce	13
4.2 Radiální rozkování.....	15
4.3 Kování bez pýchování	16
4.4 Kování s pýchováním	16
4.5 Kování desky z bramy pomocí rombického kovádla	17
4.6 Kování desek z děrovaného špalku	17
4.7 Převrácení osy	18
4.8 Patentové způsoby výroby kruhových desek	19
5. Kovářské operace	22
5.1 Vliv technologického postupu kování na jakost kruhových desek.....	22
5.2 Zeslabování tloušťky prodlužováním	23
5.3 Rozšiřování.....	24
5.4 Stupeň prokování.....	25
5.5 Volba šířky kovádla a velikosti úběru	26
5.6 Stupeň prokování při prodlužování	27
5.7 Stanovení počtu průchodů	27
5.8 Nerovnoměrnost deformace při prodlužování.....	28
5.9 Vliv poměrné délky záběru na prokování.....	28
5.10 Pýchování	30
6. Tepelné zpracování	33
6.1 Tepelné zpracování po dokování.....	33
6.2 Jakostní tepelné zpracování	34

7. Segregace	35
7.1 Makrosegregace a dendritické segregace v ocelích.....	35
8. Experimentální část.....	37
8.1 Vzorky pro napěchování.....	44
9. Závěr:	50
Literatura:	51

1. Úvod

Požadavky na kruhové desky velkých rozměrů vyžadují zlepšovat aktuální a vyvíjet nové technologické postupy jejich kování, které s žádoucí provozní jistotou umožní vyrobit kvalitní výkovky požadovaných rozměrů při minimální spotřebě oceli a nízkých výrobních nákladech. Rozměry, hmotnost a využití kruhových desek jsou uvedeny v Tab. 1. Masivní desky slouží například pro výrobu trubkovnic pro tepelné výměníky používané v energetice, lisují se z nich dna pro tlakové nádoby a mají řadu dalších použití. Převážně jde o desky kruhového tvaru, které se liší tloušťkou a průměrem. U desek pro jadernou energetiku se kladou vysoké požadavky na mechanické vlastnosti, vnitřní čistotu a případně i na další vlastnosti.

Tab. 1 Výkovky kruhových desek [3]

Rozměry výkovku D, H [mm]	Název	Ingot	Materiál	Nabídková hmotnost výkovku [kg]	Hmotnost obrobené desky [kg]	Využití kovu	H/D
4080±120 300±35	Deska	8K76	12 024	46 000	23 900	1,57	0,07
2570±45 325±35	Trubkovnice	8K50	13 123	14 000	10 200	1,37	0,13
4550±150 260±30	Kruhovka 15R01	8K64	15 313	36 500	20 300	1,8	0,06
4350±70 320±30	Kruhovka vrchlíku	8K76	15 121	41 000	26 400	1,55	0,07
2795±50 620±40	Víko	8K64	15 421	31 500	24 900	1,25	0,22
5400±100 230±50	Dno parogenerátoru	8K76	10GN2MFA	42 000	21 000	1,81	0,04
4660±100 450±50	Víko tlakové nádoby reaktoru	I110	15Ch2MFA	60 000	39 000	1,89	1,0
4400±150 360±50	Dno kompenzátoru objemu	8K76	10GN2MFA	41 800	23 500	1,5	0,08

2. Kruhové desky

Klasické technologie kování kruhových desek jsou založeny na využití základních operací volného kování – vykování špalku, jeho pýchování a rozkování napýchovaného předkovku. Výkovky kruhových desek jsou omezeny vztahem:

$$0,15 D \leq H < 0,25 D \quad (1)$$

Kde H je výška kruhové desky a D je její průměr.

Soudkovitost V je omezena vztahem: $V < 0,5 H$. Pro lisování velkých desek je potřeba zvládnout výrobu kruhových desek s poměrem výšky k průměru $H/D \sim 0,1$, případně ještě menším. Maximální průměr desky, který je možno vykovat, lze přibližně určit z empirického vztahu:

$$D_{\max} = \sqrt{k_1 k_2 \frac{2F}{\sigma_d}} \quad (2)$$

kde F je maximální síla lisu [MN], σ_d je skutečný deformační odpor oceli [MPa], k_1 , k_2 je korekční součinitel.

Volným kováním lze kruhové desky vyrábět následujícími způsoby:

- Prodłużováním napýchovaného předkovku úzkými, rovnými kovadly
- Radiálním rozkováním párem úzkých kovadel
- Radiálním rozkováním úzkým kovadlem na podložce
- Prodłużováním na podložce úzkým kovadlem [1]

3. Kovárenské ingoty a jejich jakost

Výroba velkých výkovků se zvýšenými požadavky na jejich jakost jako jsou např. výkovky pro jadernou energetiku z klasických kovárenských ingotů je velmi složitá. Důležitým předpokladem pro výrobu kvalitní oceli je kromě desoxidace i dokonalé odplynění při metalurgických pochodech v pecích a pánvi. Kromě desoxidace a odplynění tekuté oceli je velmi důležité odstranit dostatečně vycezeniny a vměstky, které jsou vážnými škodlivinami a značně zhoršují kvalitu oceli. To se provádí pomocí vakuové desoxidace – VCD proces, který

je také účinný pro snižování makrosegregací [4]. Proto se hledají nové technologie výroby velkých ingotů s dokonalejší strukturou. Ve světě se již běžně používá pro výroba ingotů elektrostrusková rafinace. Při kování ingotu vyrobeného touto technologií jsou segregace minimální, ingot má výhodnější strukturu, nemá hlavu ani patu a zvyšuje se využití kovu při současném snížení nákladů na kovářské operace [5]. Výkovek může být vyroben s nižší hodnotou stupně prokování, čímž dojde ke snížení nákladů v kovárně [6]. Otázkou však je, zda uvedené úspory v kovárně převáží zvýšené náklady, které si vyžádá tato použitá technologie. Kromě této technologie se pro výrobu kovárenských ingotů používají i další technologické metody, jakou je např. proces MHKW, který představuje kombinací klasického odlévání kovárenských ingotů a navazující elektrostruskového přetavování. Postup je určen pro výrobu velkých ingotů bez „V“ segregace a porézности [7]. Po odlití se klasický kovárenský ingot ohřeje na kovací teplotu. Středová část obsahující segregace se vyděruje na běžném kovacím lisu. Tím se získá dutý ingot. Dutina v ingotu se elektrostruskovým přetavováním vyplní ocelí přetavením elektrody uvnitř ingotu. Průměr oblasti přetaveného kovu se pohybuje přibližně kolem jedné třetiny až jedné poloviny průměru daného ingotu. Spotřeba proudu pro vyplnění dutého ingotu je zhruba o 10 % nižší, než v případě elektrostruskového přetavování celého ingotu stejných rozměrů. Další, známá technologie výroby velkých ingotů využívá "dolévání". Podstata metody vychází ze sledování postupu tuhnutí ingotu, kdy poslední množství tekuté oceli se do oceli dolévá až po určité době po odlití původního složení oceli. Chemické složení dolévané oceli je upraveno tak, aby se respektoval průběh segregace v tuhoucím ingotu. Předpokládá se, že tato metoda přináší lepší jakost středové části ingotu a menší segregace [9]. Požadavky odběratelů kruhových desek se zaměřují na homogenita struktury, prozvučitelnost a plastické vlastnosti. Tyto požadavky se převážně vztahují k technologiím výroby ingotů, kdy je potřebné zajistit ingoty se sníženou segregací, porézností, s nižším obsahem plynů a nízkým obsahem nekovových vměstků. Převážná část ocelí pro velké kovárenské ingoty se vyrábí v elektrických obloukových pecích s navazující sekundární metalurgií a v kombinaci s odplyňováním ve vakuu. Pro ingoty střední hmotnosti se využívá i elektrostruskové přetavování, které však má rozměrové a hmotnostní omezení. Pomocí této technologie lze vyrábět ingoty s vysokou jakostí, ingoty bez porézности s nízkým obsahem síry a segregací. Při výrobě velkých výkovků, určených v konečné podobě pro velká zatížení v těžkých podmínkách, je důležité při klasické technologii výroby ingotů používat ingoty s nejvyšší možnou jakostí, jelikož pro dosažení vysoké jakosti středových částí výkovku nelze pro jeho výrobu využít celou hmotnost těla ingotu, ale pouze jen určitou část, kterou lze stanovit ze vztahu:

$$0,9m_t \geq m_{uz} \quad (3)$$

$$m_{uz} = 0,9m_t^\beta - p \cdot 0,04m_t \quad (4)$$

kde m_t je hmotnost těla ingotu, β je ukazatel strukturní jakosti ingotu ($\beta = 0,988$ až $0,995$; vyšší hodnoty se vztahují k struktuře s vyšší homogenitou), p je pēchovací ekvivalent ($p = 0$ pro nepēchovaný ingot, $p = 1$ pro pēchovaný ingot).

Kromě výše uvedeného využití těla ingotu nelze pro vřkovek využít patu a hlavu ingotu. Další ztráty kovu vznikají při ohřevu a přihřevech, které činí 2 – 3 % hmotnosti ohříváného ingotu a ztráty v důsledku technologických přídavků, při využití jednotlivých kovářských operací nutných pro zhotovení vřkovku jako je pēchování a děrování [8].

4. Výroba kruhových desek

4.1 Kování kruhových desek úzkým kovadlem na podložce

Tuto technologii lze s výhodou použít při kování desek s velkým průměrem D a malou tloušťkou H . Nejpoužívanější postup sestává z napēchování předkovku – špalku na rovných pēchovacích deskách na maximální průměr, který odpovídá mezní síle lisu a postupném rozkování napēchovaného předkovku horním úzkým kovadlem na požadovanou výšku kruhové desky. Spodní plocha předkovku přitom spočívá na rovné podložce, která plní funkci spodního kovadla. Jak je vidět na obr. 1, při rozkování úzkým kovadlem se postupuje tak, že polotovar uložený na spodní podložce se postupně prodlužuje úzkým kovadlem. S postupujícími záběry se počáteční kruhový průřez polotovaru mění na přibližně eliptický. Po dokončení průchodu se deska pootočí o úhel 90° a prodlužování pak postupuje ve směru kratší osy elipsy. S postupujícími záběry se počáteční eliptický tvar desky mění na kruhový. Počet pracovních chodů lisu v jednom průchodu se určí ze vztahu:

$$n_z = \frac{D}{0,8B} \quad (5)$$

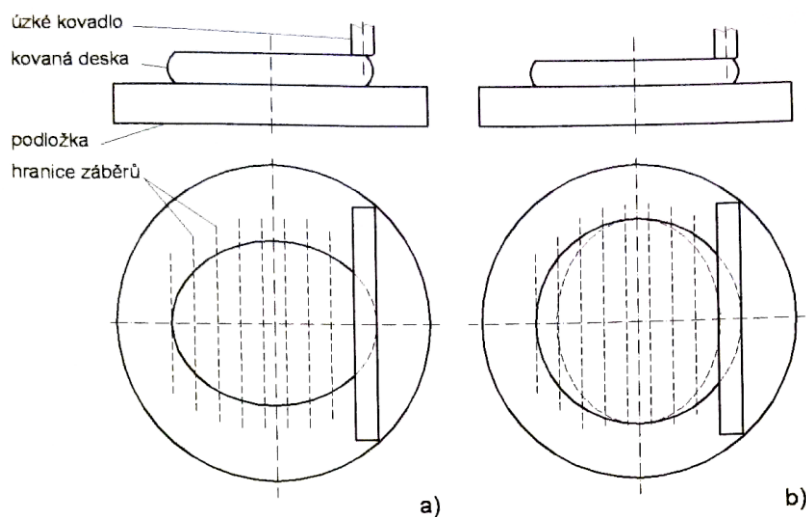
kde D je průměr rozkované desky a B šířka úzkého kovadla.

Rozkování kruhové desky úzkým kovádlem od počáteční do konečné výšky se provádí v několika průchodech, jejichž počet je určen přípustným výškovým úběrem. Jeho velikost se volí s ohledem na nebezpečí vzniku přeložek. Počet potřebných pracovních chodů lisu se v následujících průchodech zvětšuje v souladu s růstem průměru kované desky. Celkový počet záběrů závisí na šířce kovádla. Proto se při výběru kovádla volí co největší šířka, která je limitována deformační silou kovacího lisu, který je k dispozici. Potřebnou deformační sílu lze přibližně vypočítat ze vztahu:

$$F = k \cdot S \quad (6)$$

kde k je skutečný deformační odpor a S je kontaktní plocha horního kovádla s kovanou deskou.

Základními parametry určujícími deformační odpor jsou přirozený deformační odpor oceli, vnější oblasti desky – tuhé konce a třecí síla vznikající v rovině styku kovádla s kovanou deskou.



Obr. 1 Schéma rozkování předkovku úzkým kovádlem na podložce a) lichý průchod b) sudý průchod [1]

Skutečný deformační odpor můžeme určit ze vztahu:

$$k = \frac{2}{\sqrt{3}} R_e \left(1 + \frac{H}{2B} + \frac{\mu B}{4B} \right) \quad (7)$$

kde H je výška rozkované kruhové desky, B je šířka kovádkla, μ je součinitel tření, Re je mez kluzu oceli při teplotě kování.

Deformační síla lisu potřebná pro rozkování se určí ze vztahu:

$$F = k \cdot B \cdot D \quad (8)$$

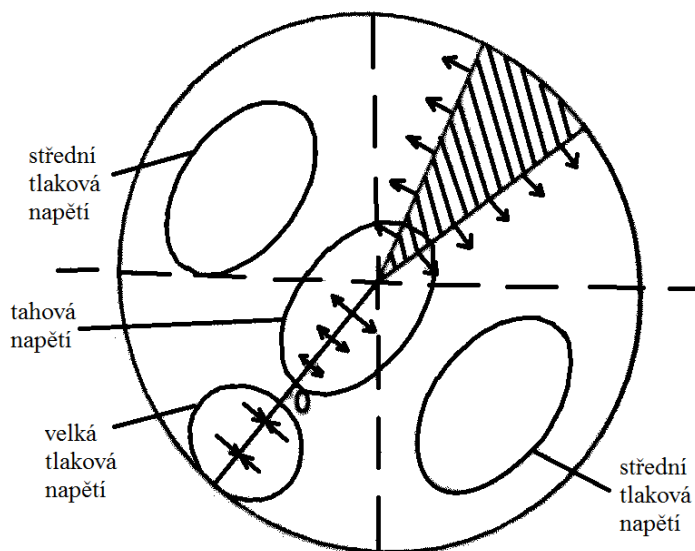
Odvození skutečného deformačního odporu je provedeno za značně zjednodušených podmínek deformace. Předpokládá se, že deformace je rovnoměrná, při záběru nevzniká v geometrickém pásmu deformace oblast přilnutí a deformace je pouze rovinná. Přesto se domníváme, že pro běžné provozní podmínky je přesnost výpočtu deformační síly podle této rovnice dostačující. Na rozdíl od různých empirických rovnic pro výpočet deformačních sil má uvedená rovnice teoretické opodstatnění, a to že se zmenšujícím se poměrem B/H zvětšováním poměrné výšky desky se vliv třecích sil na celkový deformační odpor zmenšuje, ale význam sil vznikajících na rozhraní mezi pásmem deformace a tuhými konci vzrůstá [1].

4.2 Radiální rozkování

Dalším způsobem zeslabování desky je radiální rozkování, které má několik variant. Společným znakem je zeslabení úzkým kovádkem a rozkovek se mezi dvěma údery pootáčí okolo svislé osy. Styčná plocha má tvar výseče, kde na špici výseče je nedostatečná délka záběru a je zde nebezpečí vzniku přeložek. Proto je výhodnější nejdříve uprostřed rozkovek zeslabit zatlačením kruhových přechovacích desek [10]. Stav napjatosti v případě, že se působí nástrojem na výseč je vidět na obr. 2. Materiál teče nejen pod kovádkem, ale v celém průřezu rozkovku. Ve středové oblasti působí tahové napětí až po bod O , za ním působí tlakové napětí a dochází zde k zesílení tloušťky. K zesilování a zeslabování rozkovku dochází i v oblastech, v nichž nepůsobí nástroj. Nejméně příznivé je, že v dosti velké oblasti okolo středu kované desky působí tahová napětí. Pokud se předem zeslabí střed, je tahové napětí ve středové oblasti větší. Proto se doporučuje postupovat naopak – nejprve zeslabit obvod a poté střed. Při radiálním rozkování je také důležitá manipulace, kdy je nutné zajistit vzájemné pootočení kovádkla a kovaného kusu. V úvahu přicházejí následující možnosti:

- Otáčení na jeřábu, které je však nejpomalejší a nejpracnější
- Otočné kovádklo, které je výhodné, protože má i další použití, musí se však s ním počítat při konstrukci lisu

- Otočný stůl, který lze pořídit dodatečně, je však investičně nákladný, ale má i další použití
- Speciální háky zavěšené na jeřábu, kde tyto háky jsou opatřeny závažím a jsou výkyvné do stran. V nezátíženém stavu visí šikmo, při nadzvedání rozkovku se natočí svisle [2].



Obr. 2 Hlavní oblasti napětí při radiálním rozkování [2]

4.3 Kování bez přechování

Pokud je na základě kovářských rozměrů možné použít daný ingot bez přechování, tj. rozměry se dají dosáhnout přímo z ingotu a je dosažen i požadovaný stupeň prokování, probíhá kování v tomto sledu. Nejprve se vykove čep. Poté se překová tělo ingotu na průměr, tak aby poměr H/D nebyl větší než 2,5 a usekne či upálí se špalek. Špalek se napěchuje na požadovanou výšku, případně na maximální výšku kolik je lis schopen silově utlačit a do požadované konečné výšky se rozková kovádkem na podložce. Při tomto způsobu lze dosáhnout maximálního průměru 3 200 mm [17].

4.4 Kování s přechováním

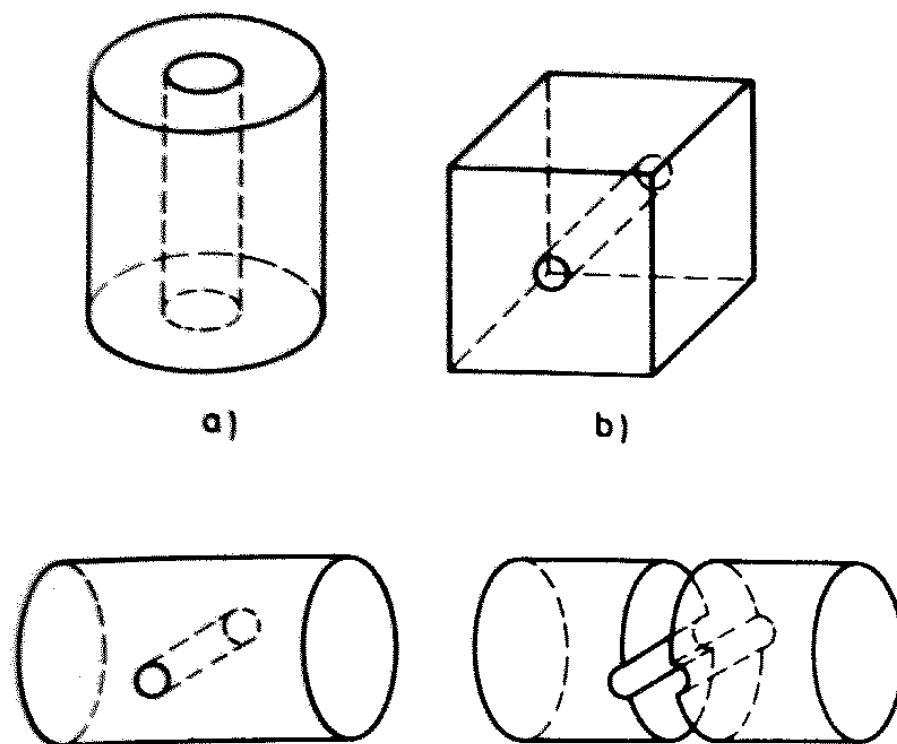
Pokud je na základě kovářských rozměrů nutno ingot přechovat, tj. rozměry se nedají dosáhnout přímo z ingotu, nebo není dosažen požadovaný stupeň prokování, probíhá kování v následujících operacích. Nejprve se vykove čep. Poté se ingot napěchuje, překove se tělo ingotu na čtvercový či obdélníkový průřez tak, aby přepočet průřezu odpovídal střednímu průměru ingotu. Poté se překove tělo ingotu na průměr tak, aby poměr H/D nebyl větší než

2,5 a dojde k useknutí či upálení špalku. Špalek se napěchuje na požadovanou výšku, případně na maximální výšku, kterou je lis schopen silově utlačit a do požadované výšky se rozková kovádkem [17].

4.5 Kování desky z bramy pomocí rombického kovádla

Při kování kruhových desek lze využít kovádla s lomenou záběrovou hranou, např. v případě, pokud chceme vykovat z obdélníkové nebo čtvercové bramy kruhovou desku. Pomocí šípového nebo rombického kovádla orientovaného tak, aby se začalo prodlužovat od středu hrany, se postupně dává vypuklý tvar všem čtyřem hranám, čímž se získá se tak dosti dobrá kruhovitost [21].

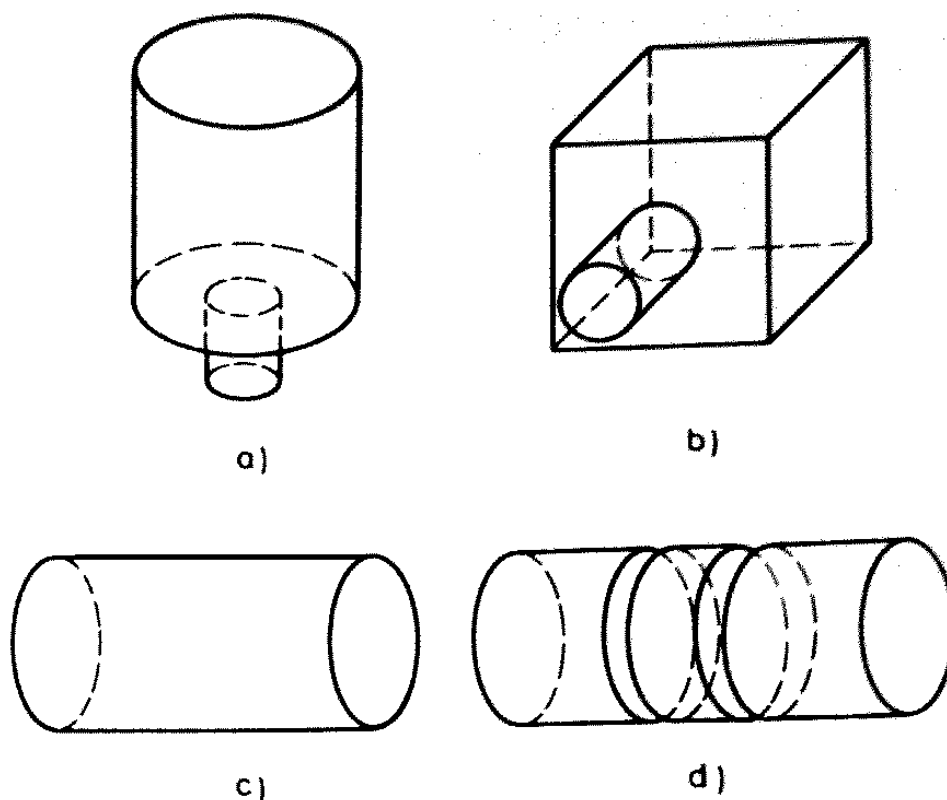
4.6 Kování desek z děrovaného špalku



Obr. 3 Kování kruhových desek z děrovaného špalku a) děrování b) vykování kvadrátu na trnu c) překování na válec d) dělení válce [21]

Jak je vidět na obr. 3, vyděrovaný špalek se na trnu překove na kvadrát, z něho se vykove válec tak, aby otvor byl kolmý k ose. Válec se poté rozdělí na dvě části, z nichž se vykovou dvě desky [21].

Jiným způsobem lze z napěchovaného špalku kovat kvadrát a z něho se vykove válec s osou kolmou k původní ose ingotu. Jak je vidět na obr. 4, tento válec se rozdělí na tři části. Střední část obsahuje podhlavové nečistoty, obě krajní části se využijí pro kování desek [21].

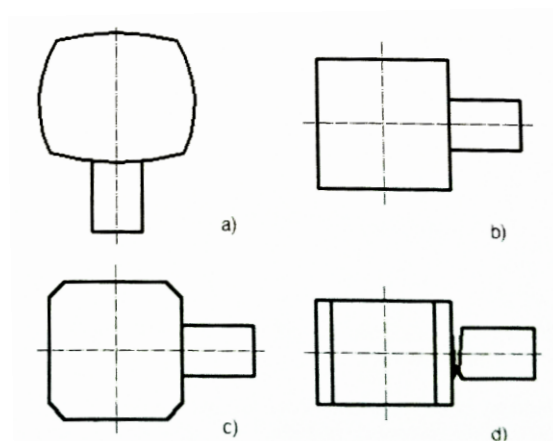


Obr. 4 Kování kruhových desek s odstraněním osových nečistot při dělení
a) napěchovaný špalek b) překování na kvadrát c) odseknutí manipulačního čepu a kulacení kolmo k původní ose ingotu d) sekání [21]

4.7 Převrácení osy

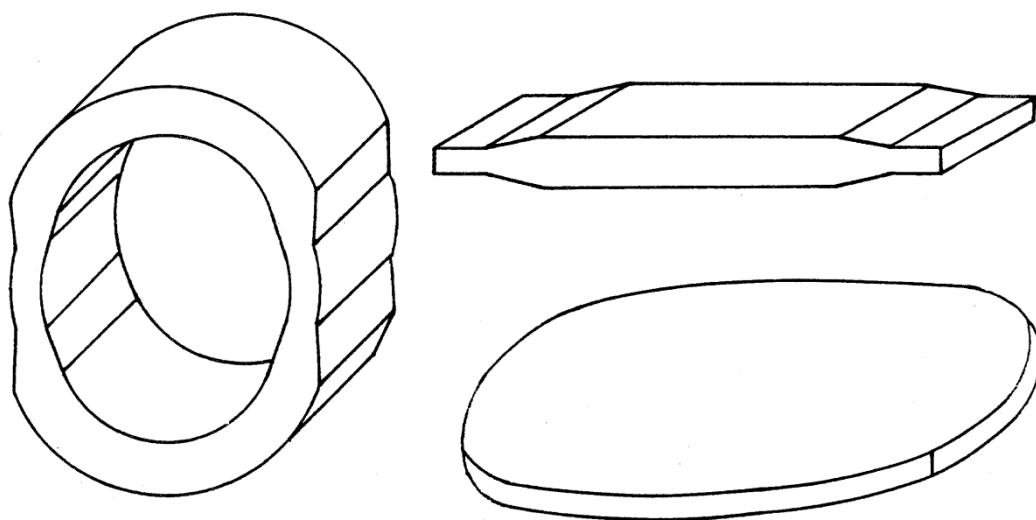
Při kování kruhových desek se ingot pěchuje, obrátí se osa a radiálně se rozkovává. Postup při obrácení osy je na obr. 5. Ingot se po pěchování překová na kvadrát, zkosí se rohy a dále se kove tak, aby osa ingotu ležela v rovině desky. Podhlavové nečistoty, které jsou v ose ingotu pod hlavou se koncentrují ve střední části desky. To se projeví při ultrazvukovém zkoušení desky. Pomocí tohoto postupu převrácení osy se tyto nečistoty rozloží na větší ploše. Používají se i další varianty obrácení osy. V některých kovárnách obrácení osy nepoužívají

z důvodu dostatečné čistoty oceli. Po pēchování a případném obrácení následuje zeslabování tloušťky prodlužováním nebo radiálním rozkováním [2].



Obr. 5 Obrácení desky při kování desky a) pēchování ve směru osy b) překování na kvadrát c) zkosení rohů d) oddělení čepu [2]

4.8 Patentové způsoby výroby kruhových desek

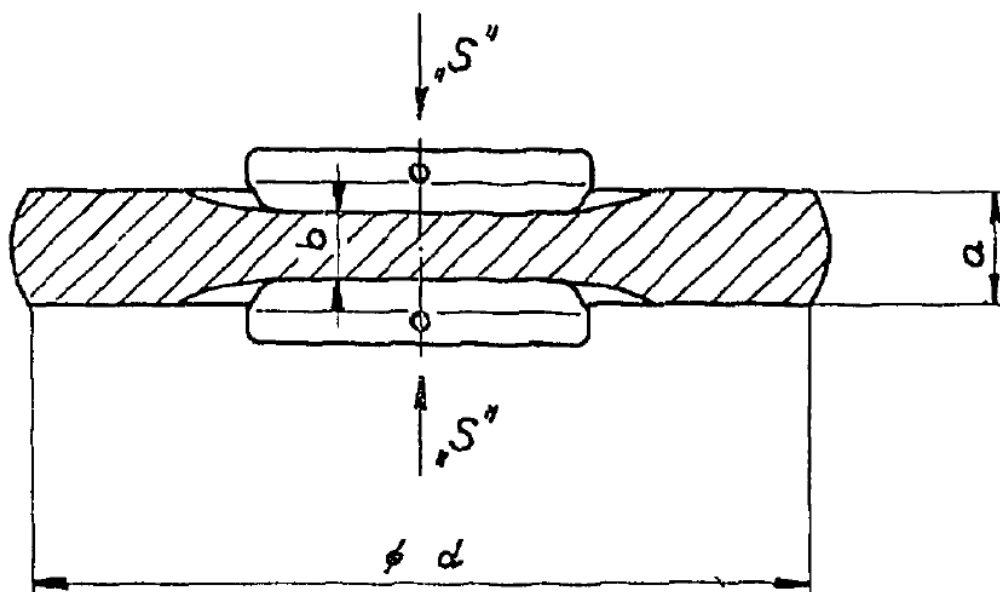


Obr. 6 Schéma výroby kruhové desky z dutého tělesa [11]

Jedním ze způsobu výroby kruhových desek, jehož schéma výroby můžeme vidět na obr. 6, je napēchování ingotu, jeho dērováním na trnu a vykováním dutého tělesa. Toto duté těleso se vykovává s tloušťkou stěny rovnou 2 násobku požadované tloušťky kruhové desky a výškou, která je 0,5 násobkem požadovaného průměru kruhové desky, přičemž průměr dutého tělesa se volí tak, aby v konečné fázi tohoto způsobu se vyrobily dvě kruhové desky. Ve stěně tělesa

se vytvoří nejméně jeden oboustranně zeslabený pás o šířce rovné 1,1 násobku tloušťky stěny dutého tělesa a tloušťce stěny rovné 2 násobku požadované tloušťky kruhové desky. Poté se upravené duté těleso uprostřed zeslabeného pásu rozdělí podélným řezem a každý jednotlivý díl se po vyrovnání prodlouží kovářím ve směru výšky původního dutého tělesa na konečnou tloušťku [11].

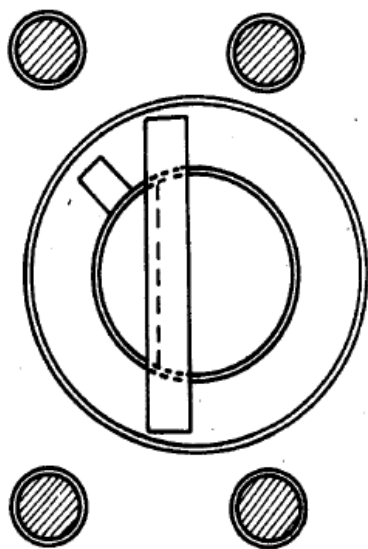
Dalším způsobem je kování kruhových desek s podstatou redukování výšky pomocí dvou protilehlých pomocných kruhových desek. Kde tento způsob spočívá ve vykování špalku z ingotu. Poté se na kovacím lisu špalek křížově rozkove na předkovek velkorozměrné kruhové desky. Do tohoto předkovku, jak je vidět na obr. 7, se oboustranně osově vtlačují ve směru „S“ protilehlé pomocné kruhové desky přiměřené velikosti do hloubky, při níž jejich vzájemná vzdálenost odpovídá požadované tloušťce kruhové desky. Po vynětí těchto pomocných kruhových desek se obvodové převýšení předkovku kruhové desky rozková za postupného pootáčení na kovacím lisu na požadovaný průměr kruhové desky [12].



Obr. 7 Zatlačení pomocných desek do předkovku [12]

Postup výroby kruhové desky sestává z vykování manipulačního čepu, zakulacení těla, oddělení paty a napěchování ingotu vypuklými deskami na špalek přibližně kulovitěho tvaru. Tento se pak dále pěchuje mezi rovnými deskami kolmo k ose čepu a tím se získá kotouč s manipulačním čepem na bočním povrchu jak je vidět na obr. 8. Kotouč se uloží na rovnou kovací desku, která leží na pojízdném stole lisu a nahrazuje dolní kovádko. Osa manipulačního čepu se v této výchozí poloze odchyluje od směru posuvu stolu o úhel 45° . V této poloze se

provedou dva prodlužovací průchody s použitím horního úzkého kovádla s vahadlem, které se nasadí na manipulační čep a za pomoci jeřábu se kotouč obrátí dolní plochou nahoru a zároveň se pootočí okolo svislé osy o 90° . Poté se pokračuje v prodlužování. Tento postup se opakuje vícekrát, poté se odsekne manipulační čep a deska se dokove dvěma průchody, mezi něž se zařadí otáčení okolo svislé osy o 90° , které se provede jeřábem. V případě, že se kove deska o průměru blížícím se světlé vzdálenosti mezi sloupy lisu, mohou nastat problémy způsobené buďto tím, že není k dispozici kovádlo potřebné délky, nebo tím, že lis nemá dostatečnou sílu. V tomto případě se nejdříve výchozí kotouč zeslabuje na kovací desce s otáčením a obracením stejně jako v předchozím případě, a když průměr rozkovaného materiálu se přiblíží délce kovádla, manipulační čep se oddělí. Při jednom průchodu se jednostranně osedí dva protější okraje desky, poté se deska pootočí okolo svislé osy o 90° a provede se další průchod, při němž se tváří zesílený pás uprostřed desky a tím se odstraní osazení. Dále bez otáčení následuje průchod, při kterém se opět jednostranně osadí druhé dva protější okraje desky. Poté se deska opět otočí okolo svislé osy o 90° a tváří se zbylý středový pás desky. Rozdělením prodlužování s osazováním do čtyřech průchodů se eliminuje porušení kruhového tvaru desky, které se projeví po provedení dvou průchodů. Výhodou tohoto způsobu je snadnější manipulace s tvářeným materiálem, rovnější povrch obou základů výkovku a vykování většího průměru desky než je délka kovádla [13].



Obr. 8 Kotouč s manipulačním čepem [13]

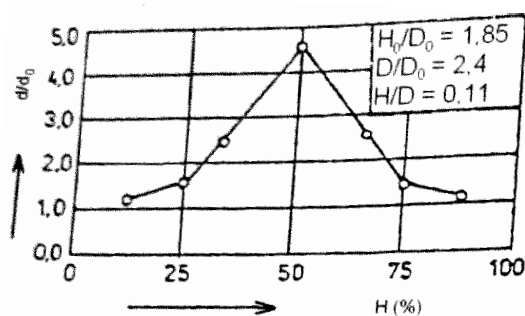
Tento způsob spočívá v odseknutí paty ingotu, vykování manipulačního čepu, překování do tvaru válce, který se dále podrobí pýchování ve směru své podélné osy mezi pýchovacími

deskami s vydutými plochami, přibližně do tvaru koule, která se dále pěchuje mezi rovnými pěchovacími deskami ve směru kolmém k původní ose vykovaného válce, do tvaru kruhové desky. Obrácením rozkovku se eliminuje nerovnoměrnost tvaru jeho obvodové plochy, která vzniká důsledkem menšího prodlužování vrstev, přiléhajících k dolní pěchovací desce. Desku je možno dále podrobit radiálnímu rozkování na větší průměr [14].

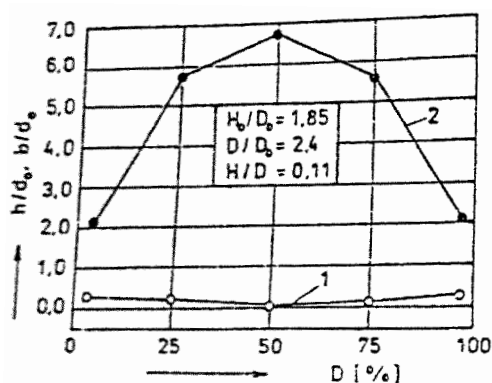
5. Kovářské operace

5.1 Vliv technologického postupu kování na jakost kruhových desek

Jakost výkovku závisí na kvalitě ingotu a technologickém postupu kování. Snahou je zlepšit prokováním mechanické vlastnosti středových oblastí ingotu, případně tyto oblasti ve výkovku přesunout do vhodnějších poloh. Ze známé lokalizace vycezenin a vměstků v těle ingotu a jejich přemísťování při pěchování a prodlužování je evidentní, že tímto postupem nelze zajistit vyhovující vlastnosti v celém průřezu výkovku, ale na jeho obvodu. Vyšší jakosti výkovku se dosáhne při změně osy ingotu. V tomto případě je osa ingotu situována uprostřed výšky výkovku kruhové desky a je kolmá na podélnou osu ingotu. Tento postup je podstatný tím, že výhodné vlastnosti jsou situovány na čelech výkovku. Deformace středových oblastí ingotu je pro původní technologii uvedena na obr. 9 a pro kování s převrácenou osou na obr. 10. Některé technologické postupy kování kruhových desek umožňují dokonale odstranit středové, méně jakostní oblasti za pomoci děrování či odseknutí, čímž se však zhorší materiálová bilance výkovku [3].



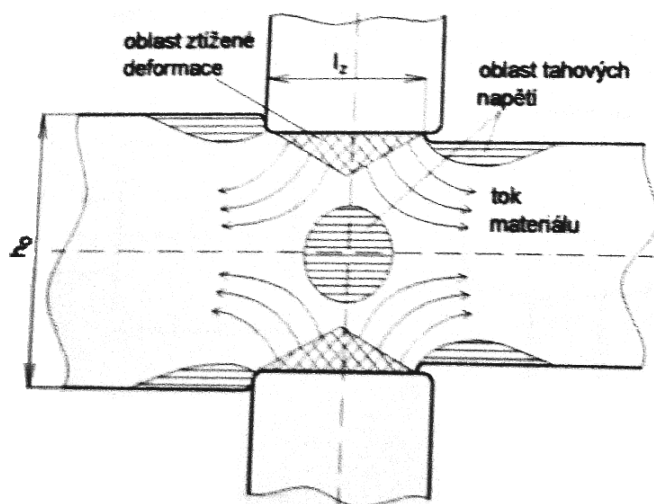
Obr. 9 Poměrná změna průměru středových oblastí ingotu (d/d_0) po výšce H výkovku kruhové desky při pěchování [3]



Obr. 10 Poměrná výška (1) a šířka (2) středových oblastí ingotu ve výkovku kruhové desky při kování s převrácenou osou ingotu [3]

5.2 Zeslabování tloušťky prodlužováním

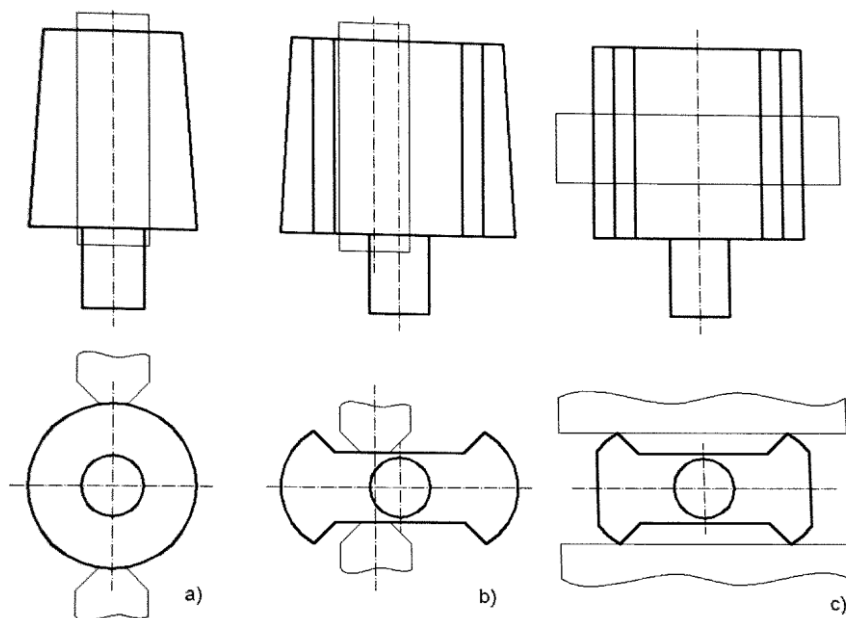
Při prodlužování je důležitým parametrem poměrná délka záběru l_z/h_0 , kde l_z je délka záběru a h_0 je vstupní tloušťka. Při malé poměrné délce záběru je menší tvářecí síla a menší šíření, v ose však působí vodorovná tahová napětí. Pro potlačení vad je důležité, aby se omezila tahová napětí ve směru osy x - vodorovném směru. Smyková napětí působí zejména na hranicích oblastí ztížené deformace a rozhodují o rozrušení lící struktury. Jak je vidět na obr. 11, napětí jsou v oblasti ztížené deformace tlaková, tahová se vyskytují v ose prodlužovaného kusu a jsou velmi malá, protože poměrná délka záběru je dostatečně velká. Velká tahová pnutí působí na volné ploše v blízkosti hran kovadla. Existence této oblasti tahových napětí byla dříve přehlížena, i když bylo známo, že v případě, kdy se trhají hrany kovaného kusu, poté k tomu dochází právě v blízkosti hran kovadel a to na vnější straně a nikoliv pod kovadly. Velikost tahových napětí v ose lze ovlivnit volbou délky záběru. Jako bezpečná hodnota, kdy jsou tahová napětí přijatelná, se uvádí poměrná délka záběru větší než 0,6 až 0,8. Na druhé straně se tím zvyšuje tvářecí síla. Výhodnější je použití kovadel nestejně šířky, kde v tomto případě dochází k potlačení osových tahových napětí. Podobný účinek lze dosáhnout při prodlužování kovadlem s válcovou pracovní plochou na podložce. Při prodlužování se rozkovek zvětšuje v podélném směru a tím dostává oválný tvar. To lze však snadno eliminovat otočením desky okolo svislé osy a následným prodlužováním v kolmém směru. Při prodlužování na desce má rozkovek tvar džbánu, nahoře je širší, což lze eliminovat obrácením okolo vodorovné osy [2].



Obr. 11 Tok materiálu a oblasti tahových napětí při prodlužování [2]

5.3 Rozšiřování

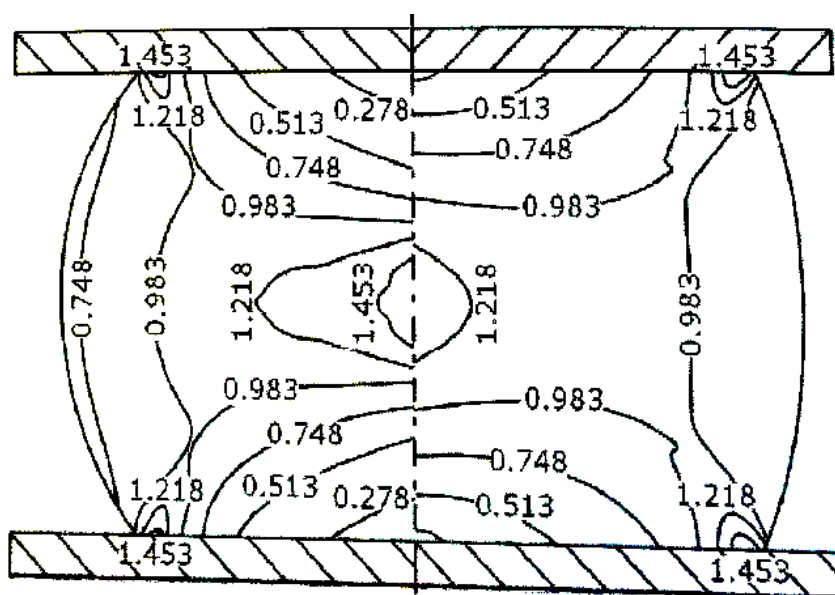
Při kování desek je možné použít operaci rozšiřování. V podstatě se jedná o prodlužování prováděné v příčném směru. S výhodou může nahradit operaci pěchování. Jak je vidět na obr. 12, rozšiřování začíná od středu, zarovnává se boční povrch a odstraňuje se úkos ingotu. Mezi výhody tohoto postupu patří rychlost, nízký počet operací, dobré protváření v ose, minimalizace oblasti tahových napětí, dále díky čepu snadnost manipulace a odpadnutí operací sekání hlavy a paty, které se odstraní při konečném vypalování desky [2].



Obr. 12 Kování desky s využitím operace rozšiřování a) ingot po vykování manipulačního čepu b) rozšiřování ingotu c) srovnání šířky a prodlužování [2]

5.4 Stupeň prokování

Při výrobě volných výkovků je technologie usměrňována dvěma základními požadavky, kterými jsou dosažení požadovaného tvaru výkovku a dosažení jeho optimálních vlastností. Prvý požadavek usměrňuje volbu velikosti ingotu. Jeho hmotnost má být taková, aby se dosáhlo maximálního využití těla ingotu. Postup kování je vybrán tak, aby počet kovářských úkonů byl co nejmenší a zpracovací náklady co nejnižší. Druhý požadavek ovlivňuje výrobní technologii z hlediska získání optimálních mechanických vlastností v celém objemu výkovku, omezení výskytu necelistvostí ve výkovku a také a dosažení požadovaného průběhu vláken. Pro splnění těchto požadavků je vhodné vybrat minimální velikost ingotu tak, aby platila zásada – jeden výkovek z jednoho ingotu. Tím se omezí nepříznivý vliv segregací, které se vyskytují v ingotu na vlastnostech výkovku. Vyšší požadavky na jakost výkovků mohou být příčinou snižování využití ingotu na bezpečnou mez, zabráňující výskytu necelistvostí ve výkovku. Zařazením operace pěchování do výrobního cyklu se dosahuje dokonalého sváření vnitřních necelistvostí a ředin přenášených z ingotu do výkovku. Dostatečné prokování ingotu zaručuje dosažení optimálních mechanických vlastností výkovků. Při kování je stupeň deformace v objemu výkovku nerovnoměrný, tím i vliv stupně prokování ingotu na mechanické vlastnosti výkovku vychází ze zjednodušeného předpokladu, že na nerovnoměrnost deformace nebere zřetel. V jednotlivých základních kovářských operacích může být nerovnoměrnost deformace značná, jak je vidět na obr. 13.



Obr. 13 Rozdělení skutečné deformace v objemu špalku po stlačení o 30 % ($e = 0,693$)
[20]

Při návrhu postupu kování výkovků kruhových desek se vychází ze zvoleného ingotu. Jeho velikost je předurčena rozměry a hmotností desky s cílem dosažení maximálního využití ingotu. Pokud respektujeme minimální stupeň prokování dle základní rovnice, musíme pro uvedený typ výkovku stanovit optimální průměr špalku D_S , z něhož bude deska napěchována. Pokud v rovnici pro výpočet stupně prokování výkovků typu desky vyjádříme stupeň prokování špalku vztahem:

$$K_S = \frac{D_0^2}{D_S^2} \quad (9)$$

a konečný stupeň přechování:

$$\sqrt{P'} = \frac{D_k}{D_S} \quad (10)$$

poté průměr špalku je:

$$D_S = \sqrt[3]{D_k \frac{D_0^2}{PK}} \quad (11)$$

Obdobně můžeme optimální průměr špalku stanovit i při jeho kování z přechovaného ingotu, a to úpravou základní rovnice pro výpočet stupně prokování vztahujícímu se pro výkovky kruhových desek:

$$D_S = \sqrt[3]{0,8P \frac{D_0^2}{PK}} D_k \quad (12)$$

kde m je D_k je konečný průměr desky, D_S je průměr špalku, D_0 je počáteční průměr ingotu, PK je přechovací ekvivalent a P stupeň přechování [16].

5.5 Volba šířky kovádkla a velikosti úběru

Délka záběru, vyjádřená šířkou kovádkla B , výrazně ovlivní počet záběrů a tím i produktivitu rozkování. Optimální šířka kovádkla při rozkování je určena tvařitelností, technologickými faktory a také silovými možnostmi kovacího lisu, tedy jeho maximální deformační silou, kterou můžeme vyjádřit následujícím vztahem:

$$(0,625 \div 1,1)H \leq B \leq \frac{F}{\sigma_d k D} \quad (13)$$

Kromě šířky kovádky bude o intenzitě rozkování v jednotlivých průchozech rozhodovat i velikost úběru. Rozmezí optimálních úběrů je opět ohraničeno metalurgickými činiteli a produktivitou kování a musí vyhovovat podmínce [3]:

$$\varepsilon_h = 1 - \frac{1}{1,05 \div 1,3} \quad (14)$$

5.6 Stupeň prokování při prodlužování

Poměrná délka záběru l_z/h_0 rozhoduje o průniku plastické deformace do hloubky pásma deformace, o stavu napjatosti a nerovnoměrné deformaci v této oblasti. Význam poměrné délky záběru vystupuje do popředí při kování polotovarů s lící strukturou, jako jsou plynule lité polotovary a ingoty. V takovém případě je výběr činitelů souvisejících s prodlužováním zaměřen na transformaci lící struktury na strukturu tvářenou, charakterizovanou požadovanými vlastnostmi výkovku. Poměrná délka záběru představuje štíhlost pásma deformace při prodlužování. Optimální podmínky pro dokonalé prokování osově části prodlužovaných polotovarů lze dosáhnout tehdy, pokud poměrná délka záběru leží v rozmezí $0,5 < l_z/h_0 < 0,7$. V takovém případě je oblast pásma deformace pod vlivem tlakových napětí, které přispívají k uzavírání necelistvostí v lící struktuře. Pokud při prodlužování poměrná délka záběru splňuje podmínku $l_z/h_0 < 0,5$, tak v osově části prodlužovaného polotovaru vznikají tahová napětí, tím se zhoršují podmínky pro uzavírání necelistvostí a u ocelí s nízkou tvařitelností mohou vznikat příčně orientované vnitřní trhliny. Při poměrné délce záběru $l_z/h_0 > 0,7$ se tlaková napětí v osově části polotovaru zvětšují, což je z hlediska prokování této oblasti příznivé, ale zároveň zvětšuje objem kovu přemísťovaného ve směru šířky a vznikají podélná tahová napětí na volném, bočním povrchu polotovaru [15].

5.7 Stanovení počtu průchodů

Pro určení počtu průchodů byla stanovena rovnice:

$$m = \frac{\ln(\frac{H_n}{H_0})}{\ln(1-\varepsilon_h)} \quad (15)$$

kde m je počet průchodů, H_n je konečná, požadovaná výška kruhové desky, H_0 je počáteční výška napěchovaného špalku a ε_h je poměrná výšková deformace.

Vzhledem k tomu, že výchozí polotovary i výkovky mají kruhový tvar, lze vypočítat počet průchodů z počátečního a konečného průměru:

$$m = \frac{\ln(\frac{D_n}{D_0})}{\ln(1+\varepsilon_d)} \quad (16)$$

kde D_n je požadovaný průměr kruhové desky, D_0 je počáteční průměr výkovku, ε_d je průměrná hodnota poměrného šíření a prodloužení.

Velikost úběrů v jednotlivých průchodech byla určena ze vztahu:

$$\varepsilon_h = 1 - \sqrt[n]{\frac{H_n}{H_0}} \quad (17)$$

Pro výpočet délky záběru lze použít vztah [3]:

$$(0,5 \div 0,8)H = l_z = (0,4 \div 0,8)B \quad (18)$$

5.8 Nerovnoměrnost deformace při prodlužování

Nerovnoměrnost deformace při prodlužování výrazně ovlivňuje poměrná délka záběru. Zmenšením poměrné délky záběru se nerovnoměrnost deformace zmenšuje, naopak při zvětšení poměrné délky záběru se zvětšuje. Při prodlužování rozměrných výkovků se doporučuje prodlužovat s poměrnou délkou záběru $l_z/h_0 = 0,5$ až $0,6$, kdy v osové části polotovaru nevznikají nepříznivá tahová napětí a přitom se zajišťuje vyhovující rovnoměrný průběh deformace po celé délce výkovku. Při prodlužování v několika průchodech lze zrovnoměnit deformaci přesazováním hranic pásma deformace v jednotlivých průchodech [15].

5.9 Vliv poměrné délky záběru na prokování

Stupeň prokování se využívá pro výběr jednotlivých základních operací s cílem dosažení požadovaných mechanických vlastností v hotovém výkovku. Pro výpočet stupně prokování se používají empirické vztahy, které jsou založeny na změně průřezu předkovku (výkovku) při kování. Při kování podélných výkovků se nejčastěji stupeň prokování vypočítá na základě

dvou operací (pěchování a prodlužování) a jejich vzájemné kombinaci, které ovlivní výsledné vlastnosti výkovků. Pro podélné výkovky, u nichž je poslední operací prodlužování se používá vztah:

$$PK = A^n P^n K \geq 3 \quad (19)$$

kde PK je stupeň prokování, A je pěchovací ekvivalent, P je stupeň napěchování ingotu, K je stupeň prodlužování ingotu, n je počet pěchovacích operací.

V případech, kdy není do technologie zařazeno pěchování ($n = 0$) lze rovnici upravit na tvar:

$$K = \frac{S_i}{S_v} \geq 3 \quad (20)$$

kde S_i je plocha příčného průřezu ingotu a S_v je plocha příčného průřezu výkovku.

Vztah (19) platí pro prodlužování na rovných kovádlech s poměrnou délkou záběru $l_z/h_i = 0,6$. Stupeň prokování závisí i na velikosti ingotu, větší ingot má horší strukturu a vyžaduje vyšší stupeň prokování. Pro standardní řadu ingotů lze stupeň prokování stanovit na základě hmotnosti těla ingotu (m_i) podle vztahu:

$$PK = 2,5 m_i^{0,0764} \quad (21)$$

Pro výpočet stupně prokování lze využít i vzorce, které vycházejí z deformační práce. Při prodlužování na rovných kovádlech se pro výpočet deformační práce používá vztah.

$$A = k V \ln \frac{h_{i-1}}{h_i} \quad (22)$$

kde k je skutečný deformační odpor oceli při prodlužování, V je objem prodlužovaného polotovaru, h_{i-1} a h_i je počáteční a konečná výška prodlužovaného polotovaru (kde $i = 0$ až n). Po úpravě rovnice (21) získáme vztah:

$$PK \equiv \frac{h_{i-1}}{h_i} = \exp\left(\frac{A}{k V}\right) \quad (23)$$

Při hypotetickém prodlužování čtvercových průřezů na rovných kovádlech bez šíření platí : $h_0 = b_1$; $h_1 = b_2$; $h_2 = b_3$; $h_{n-1} = b_n$. Po úpravě dostáváme analogický vztah odpovídající rovnici:

$$K = \frac{h_o b_o}{h_n b_n} \quad (24)$$

Při prodlužování na rovných kovádlech však platí: $h_o < b_1$; $h_1 < b_2$; $h_3 < b_3$ $h_{n-1} < b_n$.

Pokud při výpočtu stupně prokování zahrneme velikost šíření v jednotlivých průchodech dostaneme vztah:

$$K_s = b_o/h_1 \cdot b_1/h_2 \dots b_{n-1}/h_n \quad (25)$$

Pokud porovnáme velikost stupně prokování podle rovnice a tak zjistíme, že $K_s > K$, to znamená, že prokování při prodlužování při volném šíření (K_s) je větší než prokování prodlužováním bez šíření (K). Hodnota K_s je součinem poměrných výškových deformací v jednotlivých průchodech, zatímco K je součinem poměru průřezů. Hodnota K závisí na pouze na počátečním a konečném průřezu prodlužovaného tělesa, kdežto hodnota K_s závisí kromě toho ještě na poměrné délce záběru l_z/h , délce pásma deformace, součiniteli tření a velikosti úběru v jednotlivých průchodech [15].

5.10 Pěchování

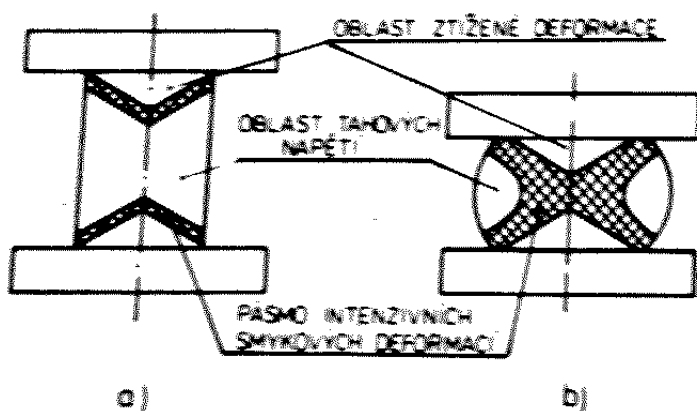
Pěchování je operace, která vede ke zvětšení příčných rozměrů výkovku na úkor zmenšení jeho výšky. Účelem je zhotovení výkovků, jejichž příčný průřez přesahuje příčný průřez výchozího materiálu, zvýšení stupně prokování, dosažení dokonalejšího rozrušení lící struktury, uzavření vnitřních dutin a zmenšení anizotropie mechanických vlastností. Pěchování je charakterizováno nerovnoměrným průběhem deformace v jednotlivých částech tvářeného materiálu. Následkem nerovnoměrné deformace vznikají v obvodových oblastech pěchovaného materiálu přídatná tahová napětí, která mohou vyústit ve vznik podélných obvodových trhlin. Tahové namáhání je pro kov nejméně příznivé, a proto se pěchování často uplatňuje jako náročná zkouška jeho jakosti. Tvar napěchovaného polotovaru je do jisté míry obrazem rozdělení deformace po jeho výšce. Soudkovitost nasvědčuje minimální deformaci v oblasti třecích kuželů, vydutí je pak podmíněno maximální deformací v této oblasti. Vznik

soudkovitosti či vydutí ovlivňují činitelé vnějšího tření, rychlost deformace a poměr výšky a průměru výchozího polotovaru. Výška výchozího materiálu je omezena vztahem:

$$H_0 \leq 2,5 d_0 \quad (26)$$

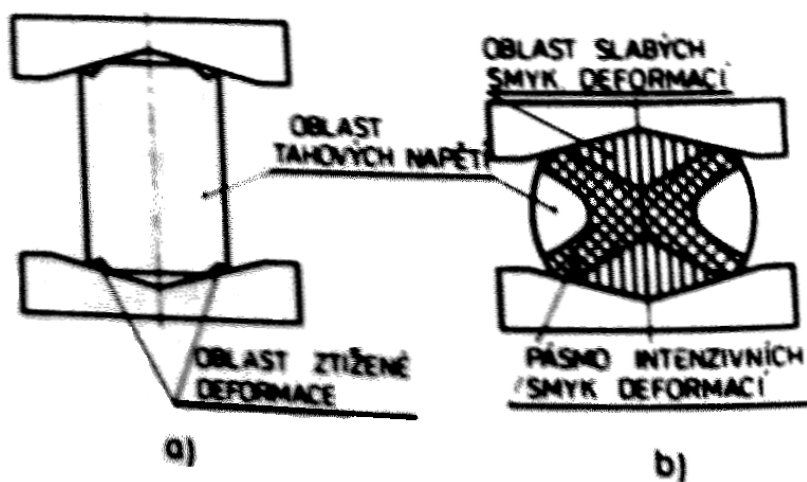
kde h_0 je výška výchozího materiálu s d_0 je průměr výchozího materiálu

Čímž se omezí vznik přídavných tahových napětí se všemi nepříznivými důsledky [20]. Uzavírání vad a rozrušení lící struktury probíhá nejintenzivněji účinkem smykových deformací. U čel pěchovaného válce jak je vidět na obr. 14, je oblast ztížené deformace charakterizovaná všestranným tlakovým napětím. Dutiny ani struktura se zde nemění. Na hranici této oblasti dochází k intenzivním smykovým deformacím, k rychlému uzavírání vad a rozrušování lící struktury. V oblasti přiléhající k bočnímu povrchu a při velké štíhlosti špalku i v jeho středu působí napětí charakterizované svislou tlakovou složkou a tahem ve dvou zbylých směrech. Dutiny se zde chovají tak, že se zmenšují ve svislém směru, osové dutiny se zvětšují v radiálním směru, dutiny blíže k povrchu se zvětšují v tangenciálním směru, lící struktura se téměř nemění [17].



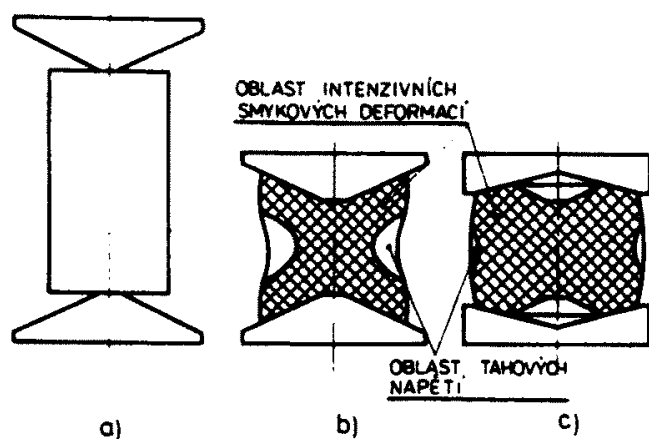
Obr. 14 Pěchování mezi rovnými deskami a) počáteční stav b) konečný stav [21]

Pěchování pomocí vydutých desek je vidět na obr. 15. Na počátku pěchování má oblast ztížené deformace tvar prstence, po malé deformaci se však dutina desek zaplní a situace je stejná jako při pěchování rovnými deskami. Síla potřebná k pěchování pomocí vydutých desek je však poněkud vyšší [21].



Obr. 15 Pěchování vydutými deskami a) počátek pěchování b) konečný stav [21]

Při pěchování vypuklými pěchovacími deskami, které je vidět na obr. 16, se celý objem protváří účinkem smykových deformací. Nejintenzivněji se tváří středová oblast, v níž je nejvíce vad. Potřebná síla je nižší než při jiných způsobech pěchování. Nakonec se čela srovnají vydutými pěchovacími deskami, kdy při následujícím prodlužování nehrozí vznik přeložek. Uvedeným způsobem lze při dané síle lisu napěchovat špalek největšího průměru [21].



Obr. 16 Pěchování vypuklými deskami a) výchozí stav b) konečná fáze pěchování c) úprava čel vydutými deskami [21]

6. Tepelné zpracování

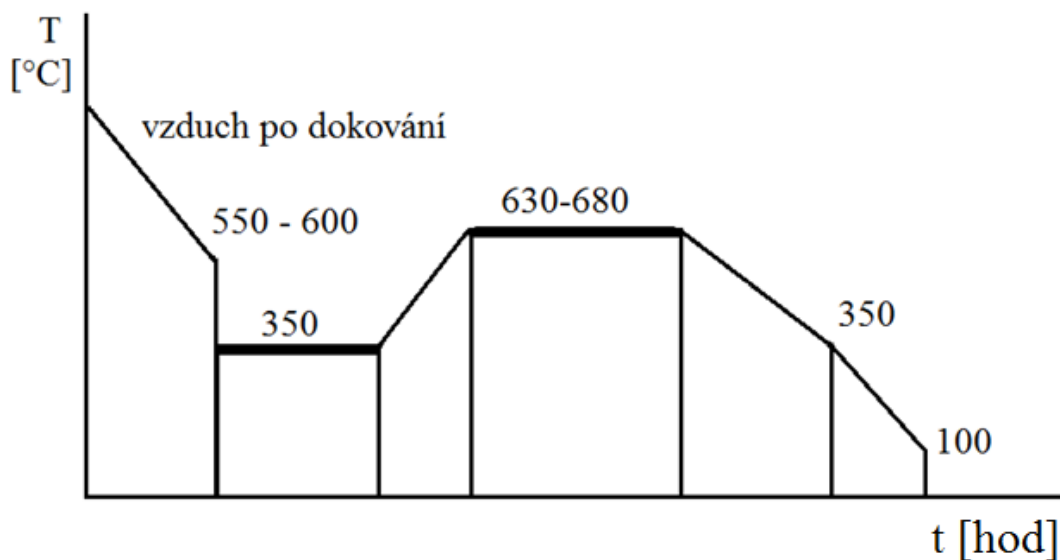
Tepelné zpracování a ošetření velkých výkovků po kování jako jsou desky, se provádí dvěma stupni zpracování.

- Tepelné zpracování po dokování
- Jakostní tepelné zpracování

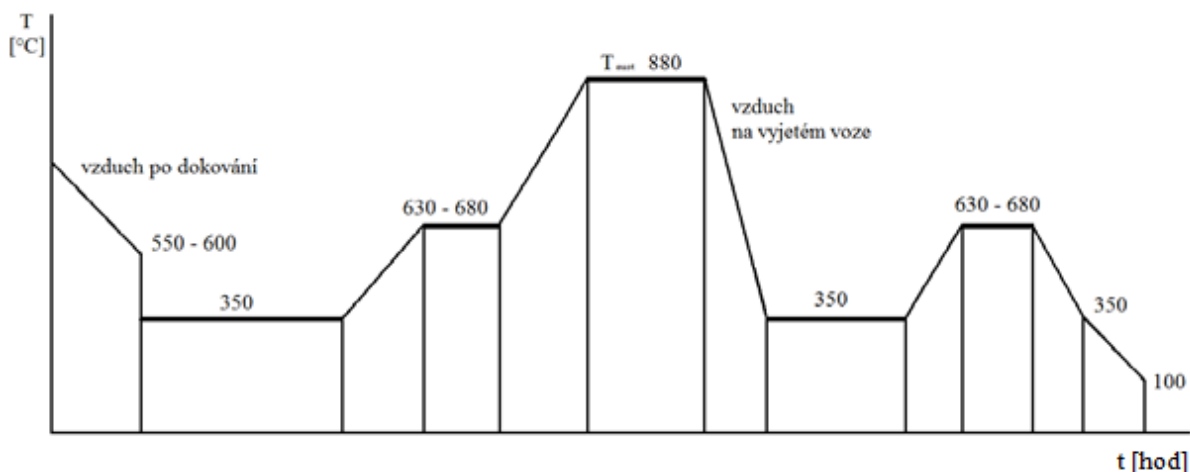
6.1 Tepelné zpracování po dokování

Tepelné zpracování po dokování se používá na odstranění pnutí, zabránění vzniku pnutí po kování při ochlazování a na odstranění vodíku ve výkovku. Režimy zpracování se určují podle chemického složení – jakosti materiálu a podle rozměrů samotného výkovku. Na ošetření výkovků jako jsou desky po kování se nejčastěji používá režim T2A a T3A.

Účelem tepelného zpracování T2A, které je naznačeno na obr. 17, je snížení tepelných, deformačních a transformačních pnutí a snížení koncentrační špičky ve výkovku. Výkovky se vychlazují volně v závětrí do dosažení povrchové teploty 550 – 600 °C, následně se vkládají do předehřáté pece a podle rozměrů se určují délky prodlev na dané teplotě. Po výdrží na teplotě se najíždí na předepsanou teplotu 630 – 680 °C s danou výdrží. Poté se výkovky vychlazují na vzduchu.



Obr. 17 Režim T2A [18]



Obr. 18 Režim T3A [18]

Režim T3A, naznačený na obr. 18, může být aplikován v případech, kdy je požadováno provedení zkoušky ultrazvukem před provedením jakostního tepelného zpracování, nebo je-li požadována optimální výchozí struktura pro následné tepelné zpracování. Výkovky se vychlazují volně v závětrí po kování do dosažení povrchové teploty 550 – 600 $^{\circ}\text{C}$, následně se vkládají do přehřáté pece a podle rozměrů se určují délky prodlev na dané teplotě. Po výdrži na teplotě se postupně najíždí na austenitizační teplotu $A_{C3} + 50 - 150^{\circ}\text{C}$, která nemá být nižší, než bude teplota austenitizace při jakostním tepelném zpracování. Ochlazení výkovku z teploty austenitizace se provádí na vzduchu. Ukončení řízeného vychlazování na vzduchu je při teplotě 350 – 400 $^{\circ}\text{C}$, poté následuje ohřev na teplotu 630 – 680 $^{\circ}\text{C}$ a vychlazení [18].

6.2 Jakostní tepelné zpracování

Jakostní tepelné zpracování slouží k získání finálních mechanických vlastností pomocí ohřevu na teplotu austenitizace a následného ponoření do kalícího média, kdy vznikají hlavní fázové transformace – strukturní přeměny. Nejčastěji se u desek používá kalení do oleje a následné popouštění. Teplota při ohřevu na kalící teplotu desek se pohybuje v rozmezí 840 – 900 $^{\circ}\text{C}$ a vychlazení pod 150 $^{\circ}\text{C}$ [18].

7. Segregace

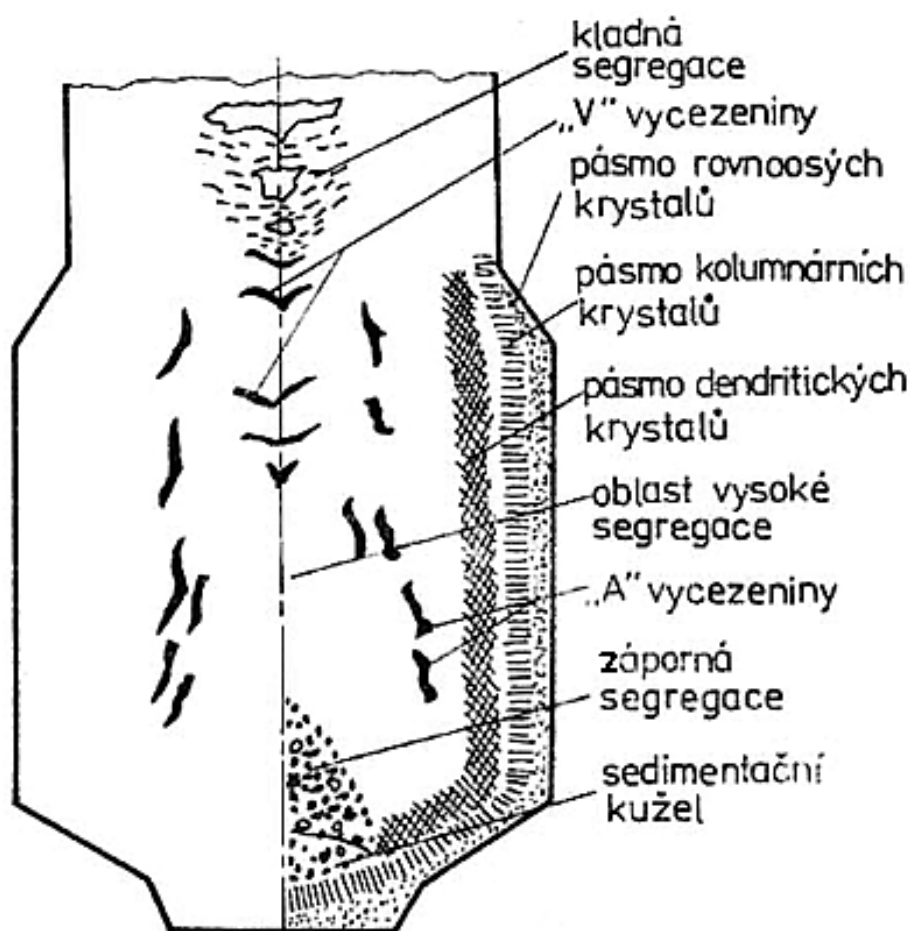
Segregace, někdy nazývané odmišení, se vyskytují v celé řadě kovových materiálů. Segregace vznikají v důsledku nerovnoměrné rychlosti chladnutí ingotu, nehomogenně od povrchu ingotu k jeho středu [23]. Velmi závažné mohou být u ocelí, a to zejména u ingotů velkých rozměrů a hmotností, které se často používají k výrobě rozměrných výkovků. Závažnost segregací u ocelí má dva hlavní důvody. Přítomnost segregací může vést ke změně struktury materiálu, která je zachována i v konečném výrobku. V oblastech segregací se většinou vyskytují struktury s vyšší pevností a tvrdostí, ale na druhé straně také s horšími plastickými vlastnostmi, tj. s vyšším sklonem ke křehkosti. Závažnějším důsledkem existence segregací je ale možnost vzniku defektů, zejména trhlin v oblastech segregací, a to v různých etapách výrobního procesu. Vznik trhlin téměř vždy znamená nutnost zmatkování takového výrobku.

Segregace v ocelích lze rozdělit na dvě hlavní skupiny:

- Segregace, jejichž příčinou je přerozdělování příměsových prvků v ocelích mezi kapalnou a pevnou fází v průběhu tuhnutí, tj. mezi teplotou likvidu a teplotou solidu dané oceli. Do této skupiny patří jednak makroskopické segregace, někdy také nazývané pásmové, jednak dendritické segregace. Míra přerozdělení prvků mezi kapalnou a pevnou fází bývá popsána různými druhy rozdělovacích koeficientů.
- Segregace, nebo přesněji mikrosegregace, jejichž příčinou je povrchově aktivní chování některých prvků, které mají v pevném skupenství tendenci soustřeďovat se v jistých privilegovaných místech struktury. Jedná se zejména o mikrosegregace prvků na hranicích zrn, dále o mikrosegregace na dalších mezifázových rozhraních, např. na rozhraní precipitáty – kovová matrice, nebo také na rozhraní nekovové vměstky – kovová matrice.

7.1 Makrosegregace a dendritické segregace v ocelích

Hlavní příčinou makrosegregací a dendritických segregací, které můžeme vidět v ingotu na obr. 19, je přerozdělování přídavných prvků v oceli mezi kapalnou a pevnou fází v průběhu tuhnutí, tj. mezi teplotou likvidu a teplotou solidu dané oceli. V případě oceli, tj. uvažujeme-li jako základní prvek železo, drtivá většina prvků v průběhu tuhnutí zvyšuje svou koncentraci v kapalně fázi. To znamená, že ty části ingotu, které tuhnou později, jsou o dané prvky obohaceny. V ingotech vznikají následující druhy makrosegregací, tzn. segregací, které se vyskytují v pásmech makroskopických rozměrů.



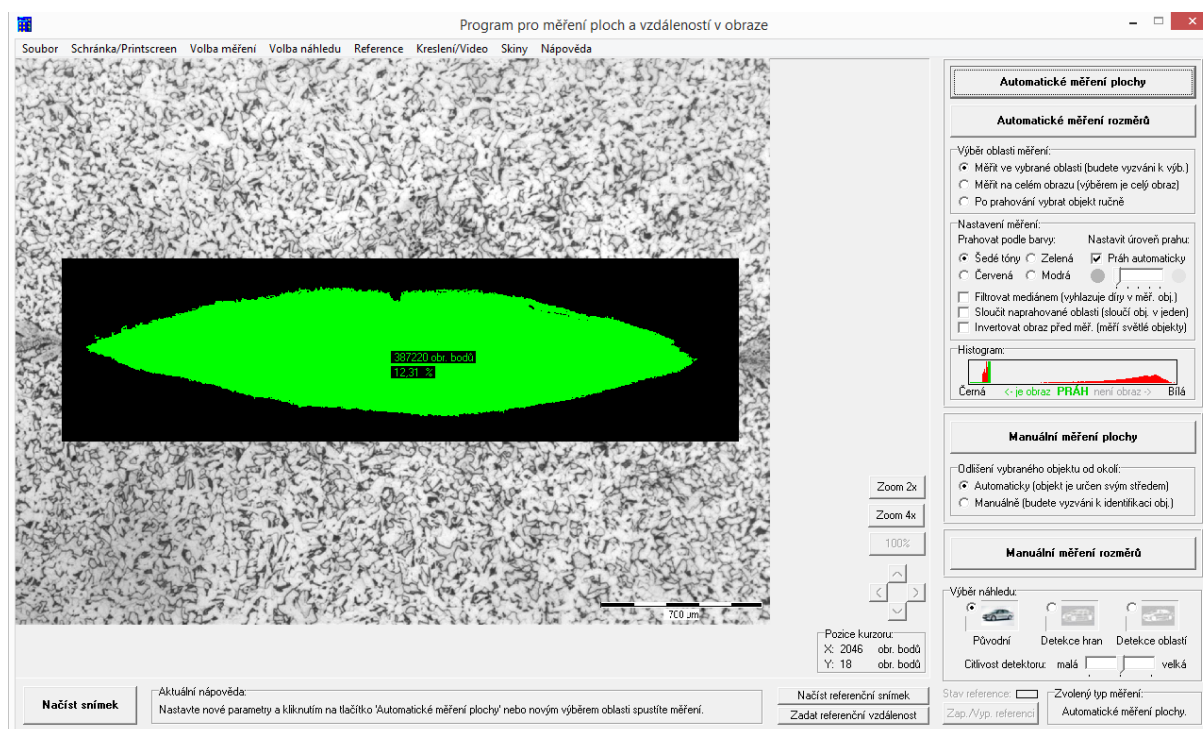
Obr. 19 Struktura kovářského ingotu [19]

Segregace typu A, nazývajících se stvolové segregace – vycezeniny, které se obvykle vyskytují v horní části ingotu, a to mezi bočním povrchem ingotu a podélnou osou ingotu. Tvoří je oblasti zvýšené koncentrace odměšujících prvků, příměsí, nečistot i produktů různých reakcí, které probíhají v oceli mezi teplotou likvidu a solidu při tuhnutí a jsou soustředěny mezi větvemi dendritů. V ocelích obsahují zejména zvýšený podíl síry, fosforu, uhlíku, manganu, molybdenu a titanu a vytvářejí charakteristické pásy stvolů makroskopických rozměrů. Segregace V, nazývajících se též mezerové segregace, vznikající tak, že nečistoty a odmišlené příměsi vyplňují při tuhnutí mezery, prostory i větší dutiny v ingotu, vzniklé z nejrozličnějších příčin. Mohou to být vnitřní trhliny, řediny, staženiny včetně dutin mikroskopických rozměrů. Tyto segregace se nejčastěji vyskytují v osově části ingotu. Důsledkem přerozdělení příměsí v oceli mezi kapalnou a pevnou fází vznikají také dendritické segregace neboli mikrosegregace. Příčina jejich vzniku je shodná s příčinou vzniku makroskopických segregací, ale vzdálenost, na níž se odmišlení uplatňuje, je v případě dendritických segregací

menší a odpovídá maximálně vzdálenosti mezi primárními osami dendritů. Ta ale většinou dosahuje hodnot desítek až stovek μm [13]. Mikrosegregace mají velký vliv na jakost tvářené oceli. Je to základní proces vzniku nestejnorodosti oceli, který lze do jisté míry ovlivňovat metalurgicky vhodnou skladbou základních vsázkových surovin, technologií výroby a odléváním, avšak dokonalé stejnorodosti dosáhnout nemůžeme [18].

8. Experimentální část

Měření necelistvostí jsem prováděl pomocí programu pro měření ploch a vzdáleností v obraze [24]. Do programu jsem načetl obrázky jednotlivých mikrostruktur necelistvostí. Označil jsem plochu dané necelistvosti, kde tento program díky rozeznávání barev spočetl plochu necelistvosti. Program zobrazil velikost plochy jednotlivých necelistvostí v počtu obrazových bodů. Poté jsem změřil velikost délky měřítka jednotlivých skenů mikrostruktury. Po zobrazení této vzdálenosti ve velikosti obrazových bodů jsem pomocí výpočtu zjistil reálnou velikost plochy jednotlivých necelistvostí.

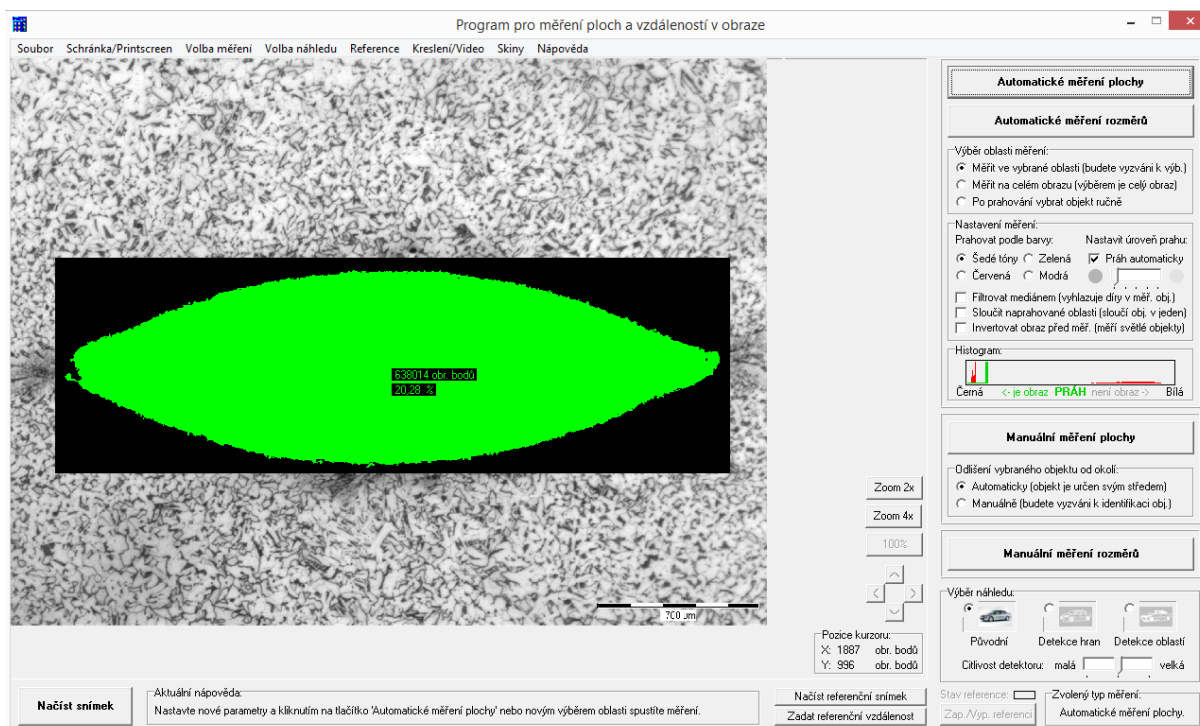


Obr. 20 Sken mikrostruktury A1/1

Na obr. 20 je ukázán sken mikrostruktury A1/1 v programu Merovo. V tabulce 2 je uvedena plocha této necelistvosti.

Tab. 2 Velikost necelistvosti v mikrostrukturně A1/1

Plocha necelistvosti	387 220 bodů
Měřítko 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm^2
Plocha 1 obrazce	1 007 314,108 $\mu\text{m}^2 = 1,007 \text{ mm}^2$

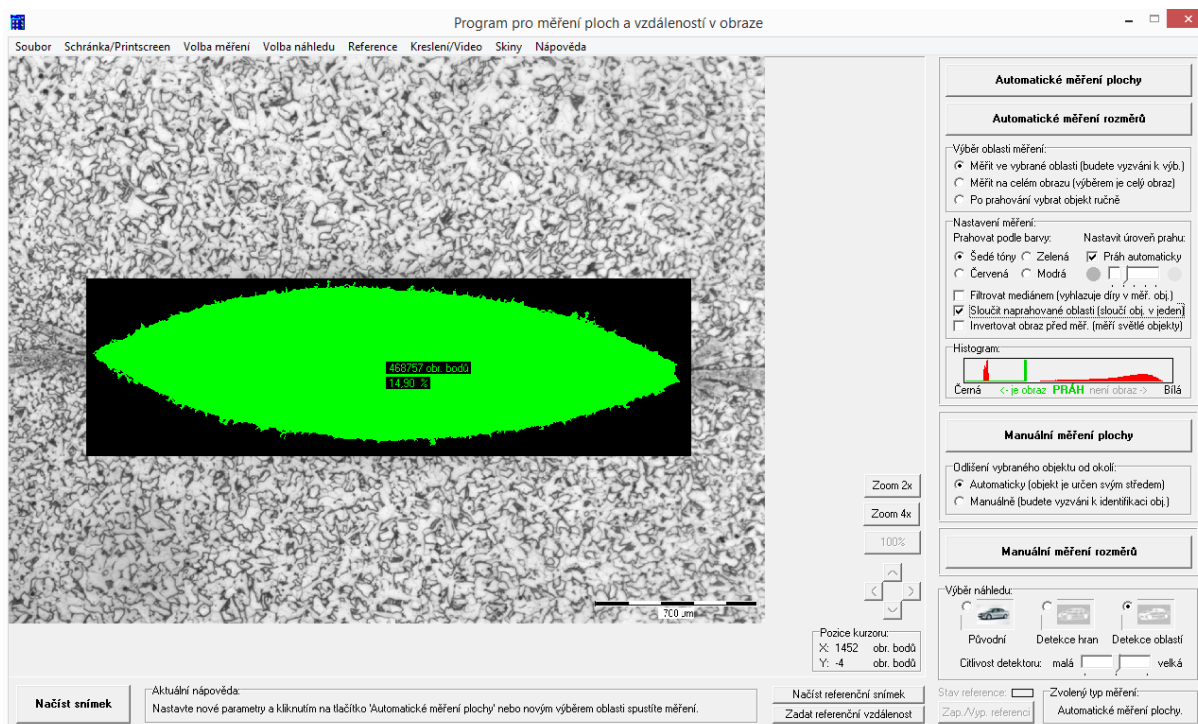


Obr. 21 Sken mikrostruktury A1/2

Na obr. 21 je ukázán sken mikrostruktury A1/2 v programu Merovo. V tabulce 3 je uvedena plocha této necelistvosti

Tab. 3 Velikost necelistvosti v mikrostruktuře A1/2

Plocha necelistvosti	638 014 bodů
Měřítko 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm ²
Plocha 1 obrazce	1 659 729,6196 μm ² = 1,6597 mm ²

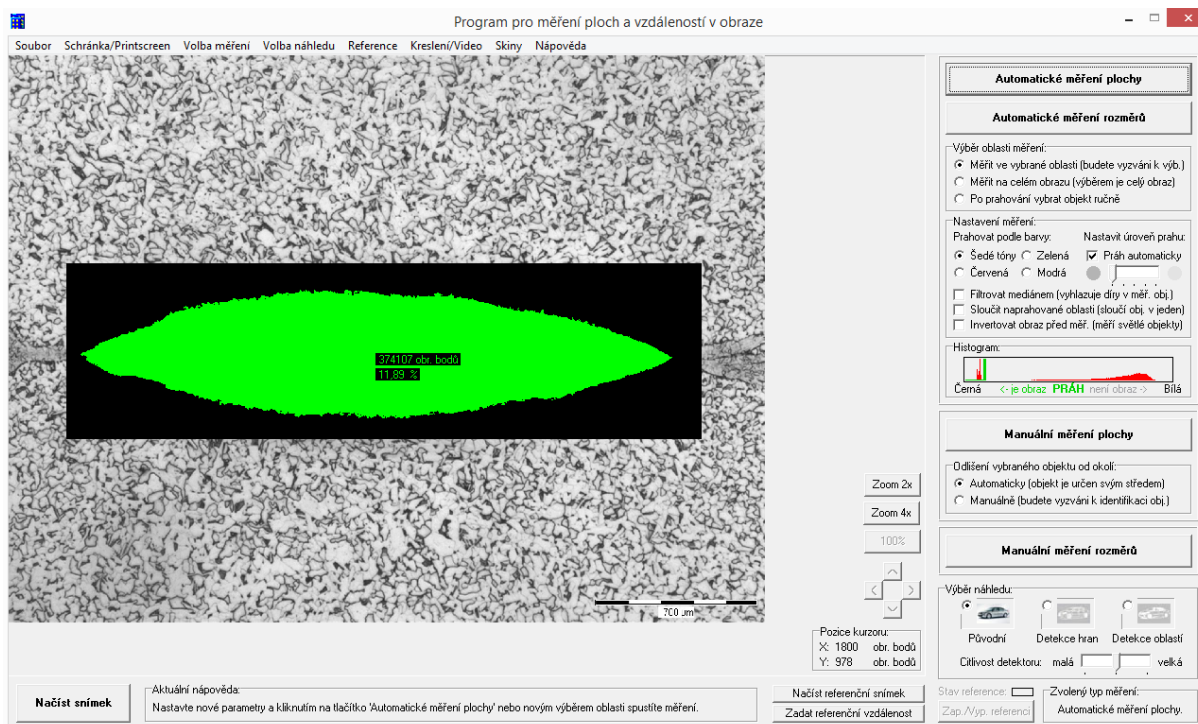


Obr. 22 Sken mikrostruktuře A1/3

Na obr. 22 je ukázán sken mikrostruktuře A1/3 v programu Merovo. V tabulce 4 je uvedena plocha této necelistvosti

Tab. 4 Velikost necelistvosti v mikrostrukturuře A1/3

Plocha necelistvosti	468 757 bodů
Měřítko 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm ²
Plocha 1 obrazce	1 219 424,4598 μm ² = 1,2194 mm ²

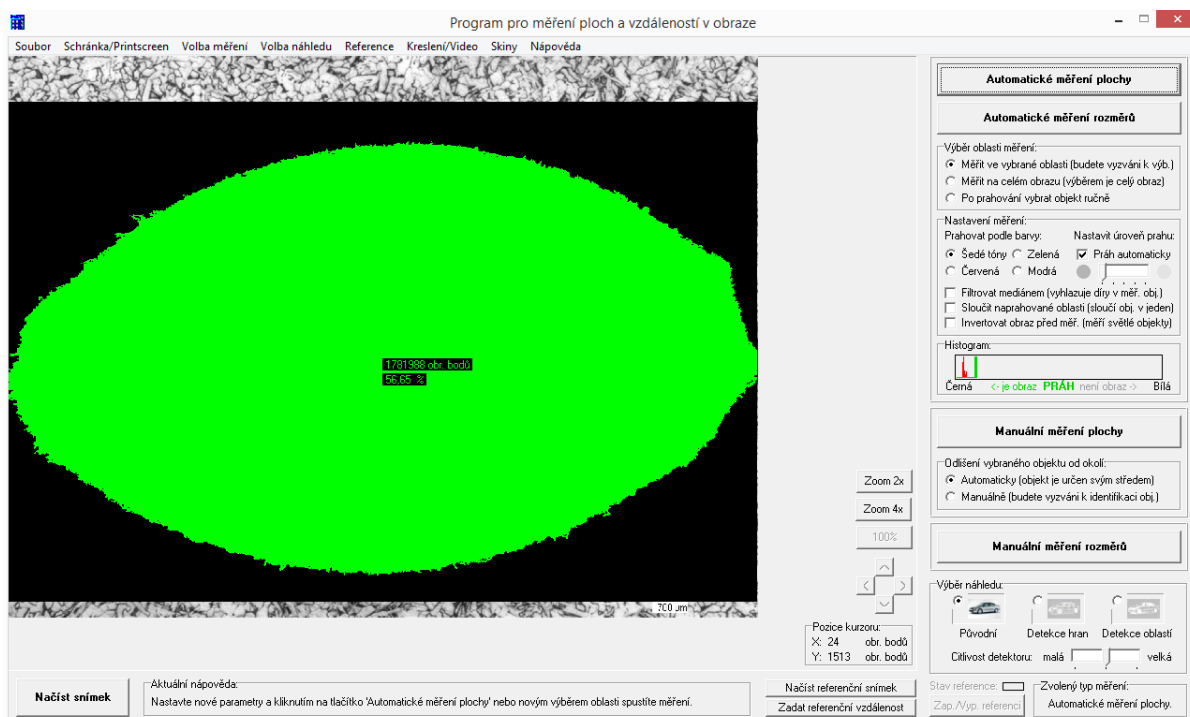


Obr. 23 Sken mikrostruktury A1/4

Na obr. 23 je ukázán sken mikrostruktury A1/4 v programu Merovo. V tabulce 5 je uvedena plocha této necelistvosti.

Tab. 5 Velikost necelistvosti v mikrostrukturu A1/4

Plocha necelistvosti	374 107 bodů
Měřítka 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm ²
Plocha obrazce	973 201,9498 μm ² = 0,9732 mm ²

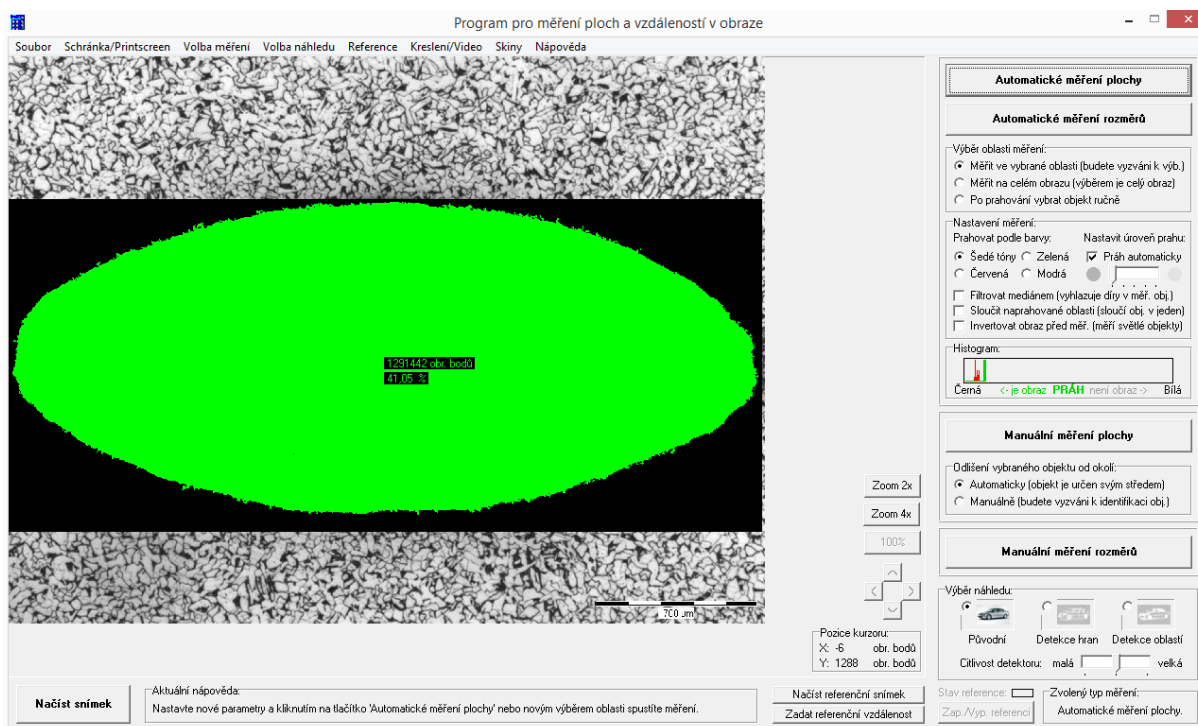


Obr. 24 Sken mikrostruktury A1/5

Na obr. 24 je ukázán sken mikrostruktury A1/5 v programu Merovo. V tabulce 6 je uvedena plocha této necelistvosti

Tab. 6 Velikost necelistvosti v mikrostrukturu A1/5

Plocha necelistvosti	1 781 988 bodů
Měřítka 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm ²
Plocha obrazce	4 635 663,5832 μm ² = 4,6356 mm ²

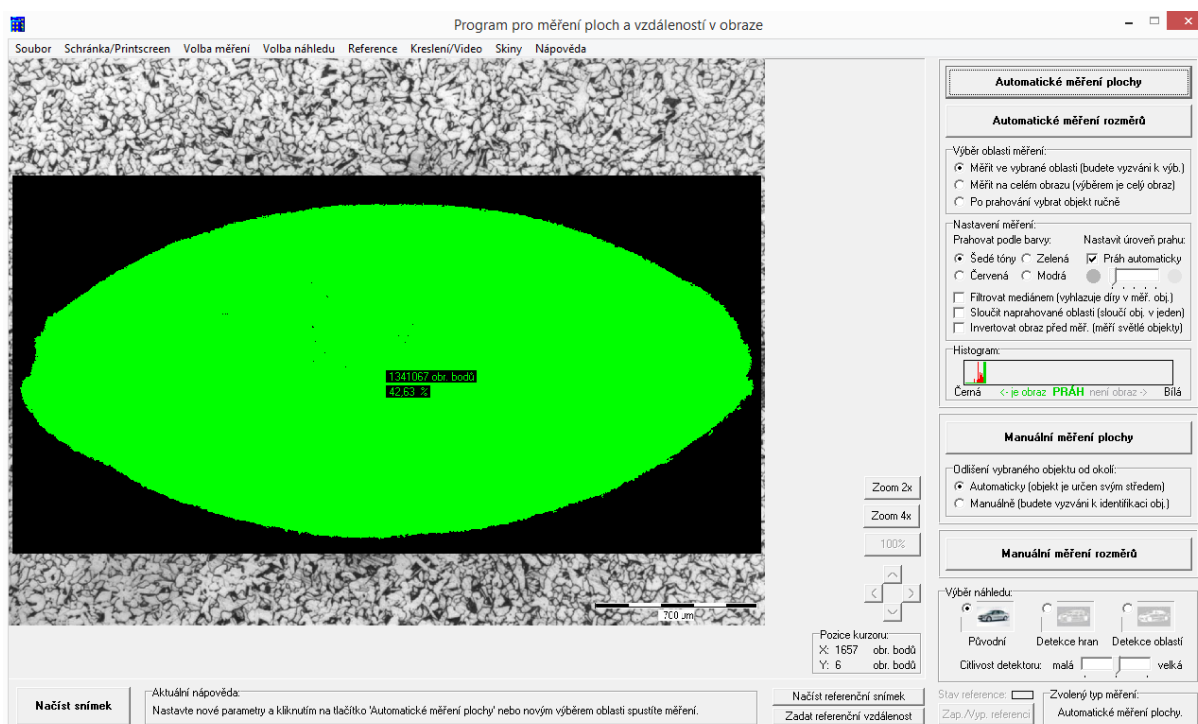


Obr. 25 Sken mikrostruktury A1/6

Na obr. 25 je ukázán sken mikrostruktury A1/6 v programu Merovo. V tabulce 7 je uvedena plocha této necelistvosti

Tab. 7 Velikost necelistvosti v mikrostrukturu A1/6

Plocha necelistvosti	1 291 442 bodů
Měřítko 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm ²
Plocha 1 obrazce	3 359 557,2188 μm ² = 3,3595 mm ²



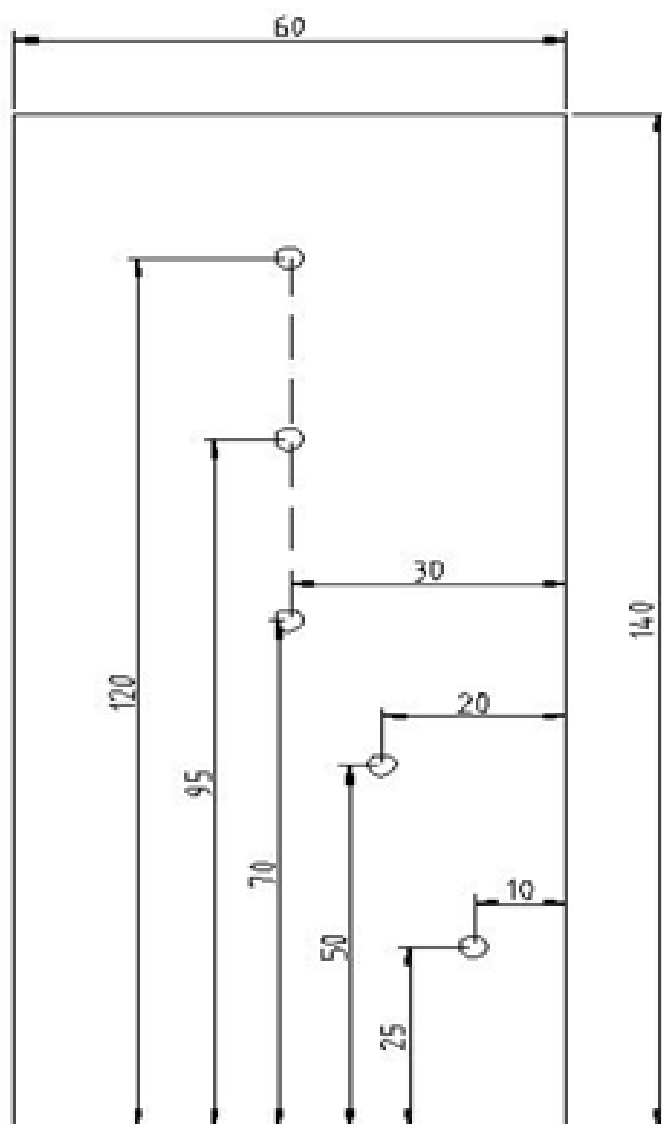
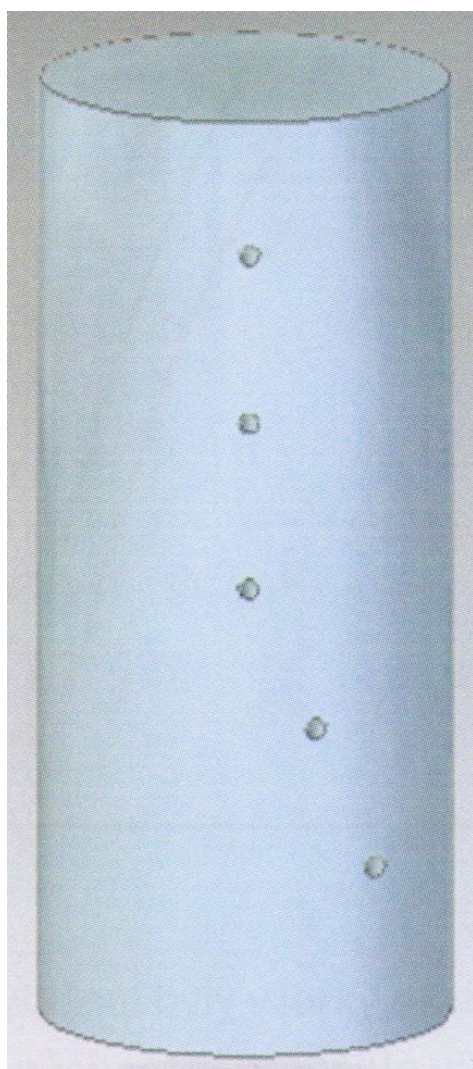
Obr. 26 Sken mikrostruktury A1/7

Na obr. 26 je ukázán sken mikrostruktury A1/7 v programu Merovo. V tabulce 8 je uvedena plocha této necelistvosti

Tab. 8 Velikost necelistvosti v mikrostruktuře A1/7

Plocha necelistvosti	1 341 067 bodů
Měřítko 700 μm	434 bodů
Rozměr 1 μm	0,62 bodu
Rozměr 1 bodu	1,612903 μm
Plocha 1 bodu	2,6014 μm^2
Plocha 1 obrazce	3 488 651,6938 $\mu\text{m}^2 = 3,4886 \text{ mm}^2$

8.1 Vzorky pro napěchování



Obr. 27 Špalek s příčně vyvrtanými otvory

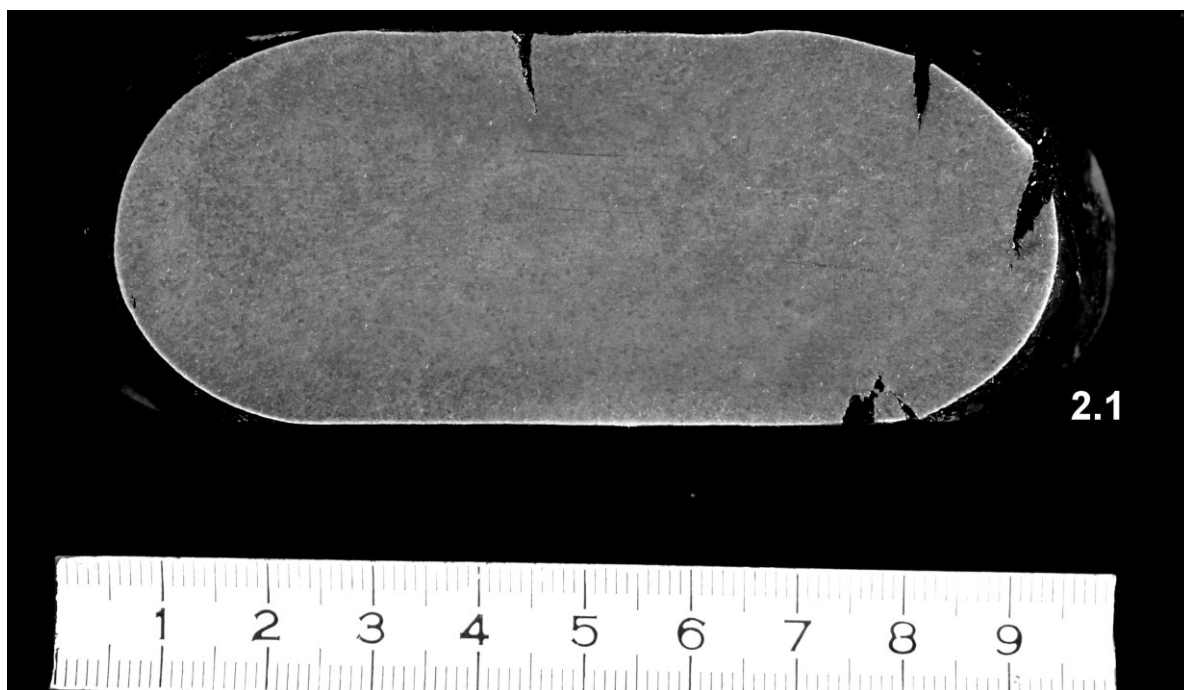
Vzorky, jejichž nákres s rozměry je uveden na obr. 27, byly kovány na lisu 7,5 MN. Vzorky byly ohřáty v peci vytopené na 1150 °C. Vzorky byly sazeny přímo do této teploty a výdrž činila 15 – 30 minut. Po vytažení byly vzorky okamžitě přeneseny k lisu a napěchovány, konečný stav můžeme vidět na obr. 28. Po napěchování byly vzorky označeny a vychlazeny na klidném vzduchu. Rozměry vzorků po napěchování jsou uvedeny v tabulce 9. U vzorku byla použita klasická technologie pomocí rovných pěchovacích desek. U vzorku 4 byla použita nová technologie pěchování pomocí vypuklých desek a poté dopěchování pomocí klasických rovných desek.

Tab. 9 Rozměry vzorků po kování

Označení	Průměr [mm]	Výška [mm]	Směr vyvrtaných děr
2	117	37	Příčně
4	127	32	Příčně

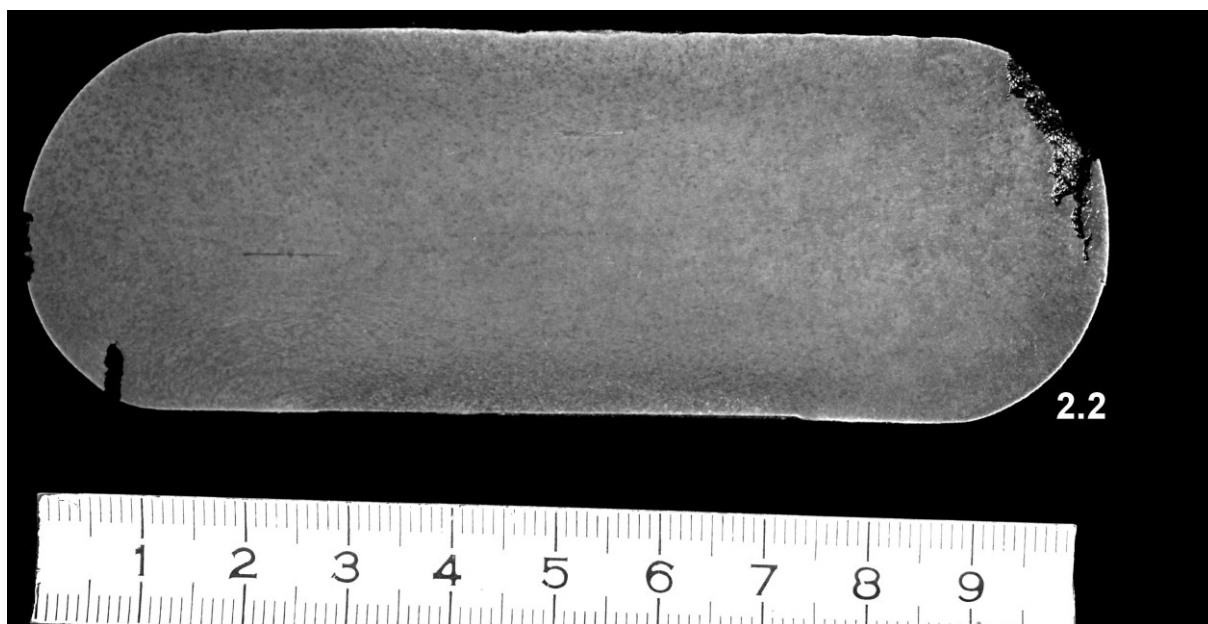


Obr. 28 Vzorek 2 po napěchování



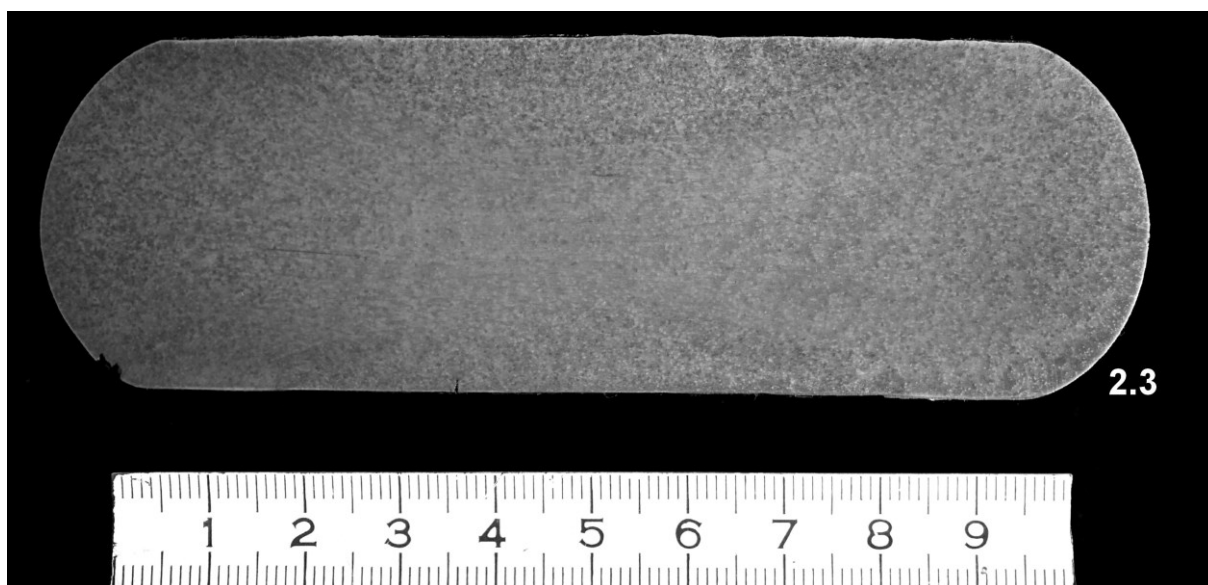
Obr. 29 Vzorek 2.1

Vzorek 2, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 73 \%$ a stupněm napěchování $P = 4$ obsahoval ve vzdálenosti 45 mm od osy vzorku necelistvost o rozměru 9 x 0,25 mm, kterou můžeme vidět na obr. 29. Plocha této necelistvosti je 2,25 mm², což je 31,8 % plochy původní díry



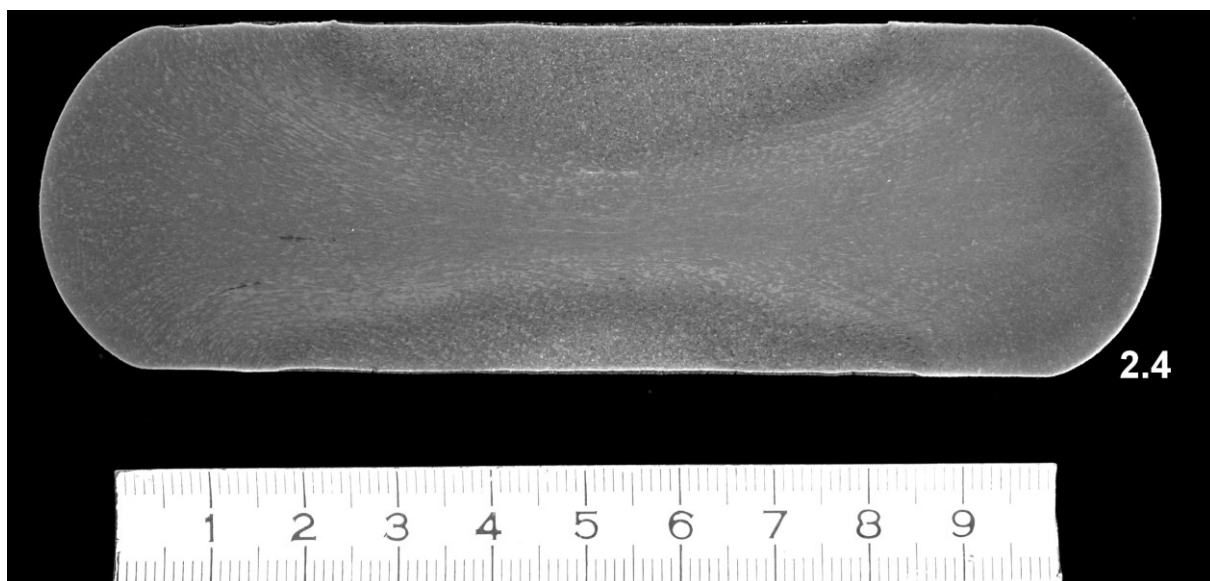
Obr. 30 Vzorek 2.2

Vzorek 2, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 73 \%$ a stupněm napěchování $P = 4$ obsahoval ve vzdálenosti 30 mm od osy vzorku necelistvost o rozměru $9 \times 0,25$ mm, kterou můžeme vidět na obr. 30. Plocha této necelistvosti je $2,25 \text{ mm}^2$, což je 31,8 % plochy původní díry.



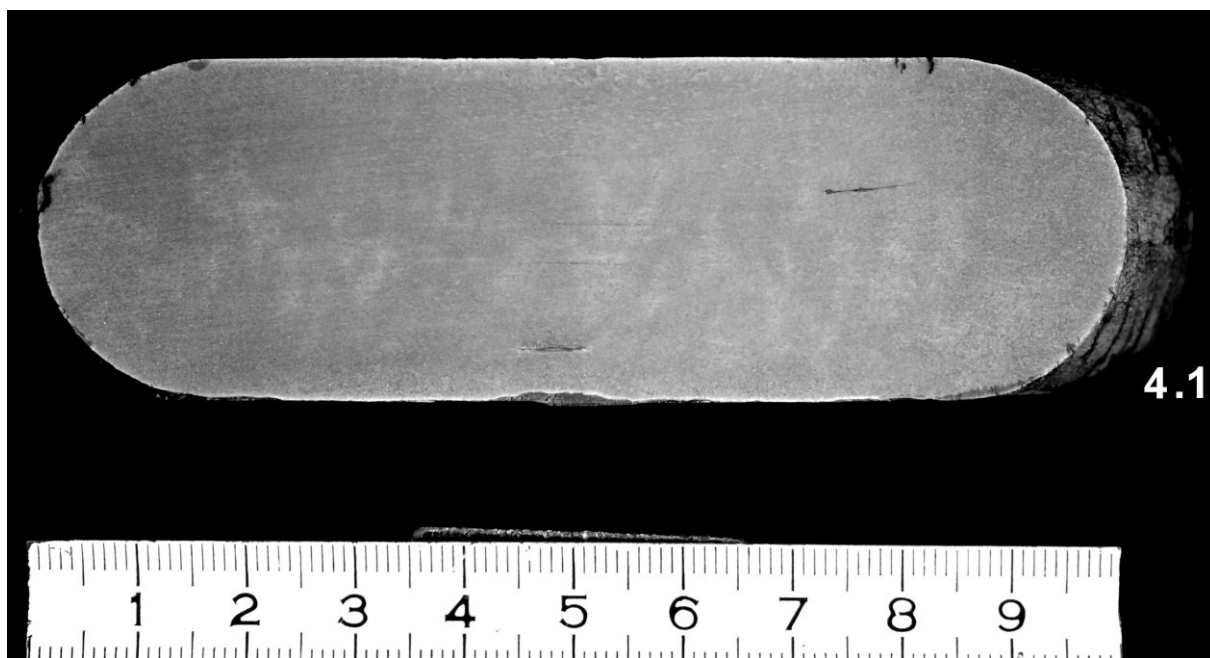
Obr. 31 Vzorek 2.3

Vzorek 2, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 73 \%$ a stupněm napěchování $P = 4$ obsahoval ve vzdálenosti 15 mm od osy vzorku necelistvost o rozměru $10 \times 0,25$ mm, kterou můžeme vidět na obr. 31. Plocha této necelistvosti je $2,5 \text{ mm}^2$, což je 35,3 % plochy původní díry.



Obr. 32 Vzorek 2.4

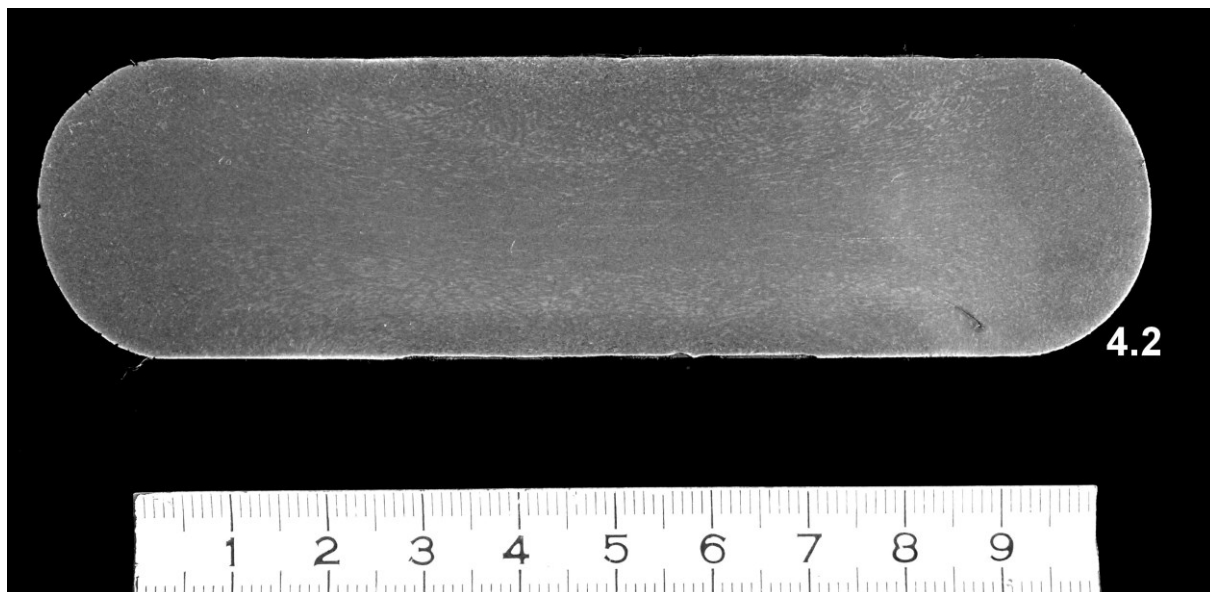
U vzorku 2, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 73 \%$ a stupněm napěchování $P = 4$ došlo v ose vzorku k uzavření necelistvosti, jak můžeme vidět na obr. 32.



Obr. 33 Vzorek 4.1

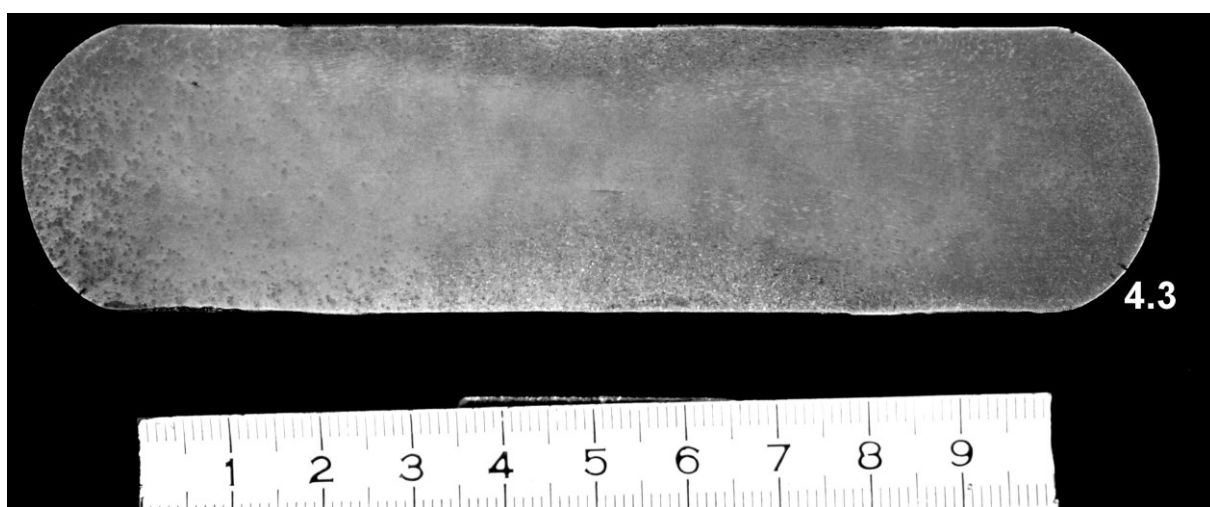
Vzorek 4, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 76,8 \%$ a stupněm napěchování $P = 4,55$ obsahoval ve vzdálenosti 48 mm od osy vzorku necelistvosti o

rozměrech 4 x 0,5 mm a 7 x 0,5 mm, kterou můžeme vidět na obr. 33. Plocha těchto necelistvostí je 2 mm² a 3,5 mm², což je 28,3 % a 49,5 % původních ploch děr



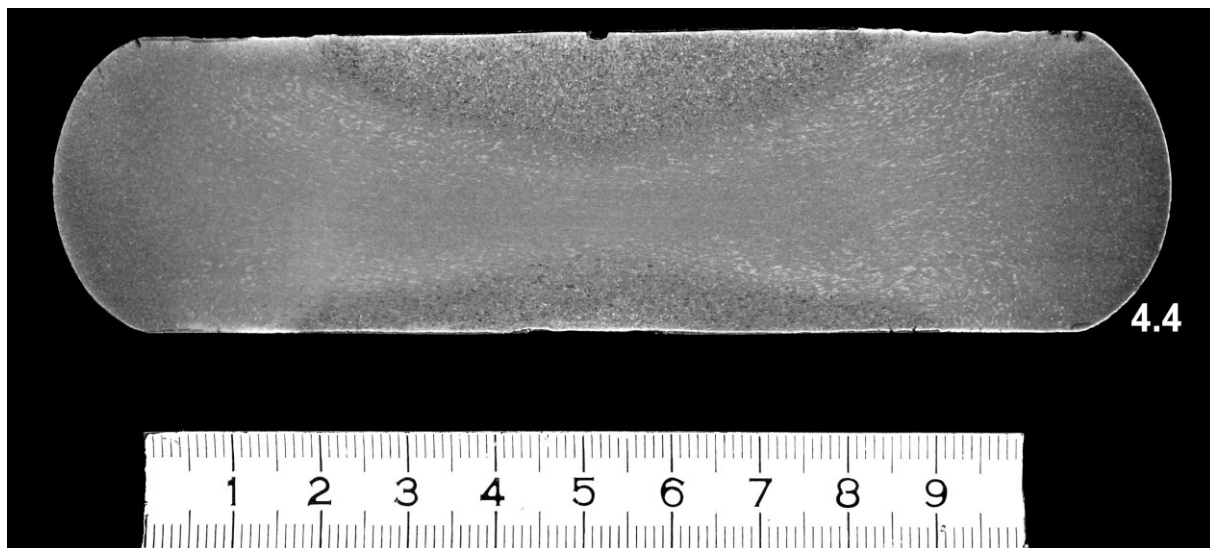
Obr. 34 Vzorek 4.2

Vzorek 4, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 76,8 \%$ a stupněm napěchování $P = 4,55$ obsahoval necelistvost o rozměru 3 x 0,5 mm ve vzdálenosti 32 mm od osy vzorku, jak můžeme vidět na obr. 34. Plocha této necelistvosti je 1,5 mm², což je 21,2 % plochy původní díry.



Obr. 35 Vzorek 4.3

Vzorek 4, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 76,8 \%$ a stupněm napěchování $P = 4,55$ obsahoval ve vzdálenosti 16 mm od osy vzorku necelistvost o rozměru $3 \times 0,2$ mm, kterou můžeme vidět na obr. 35. Plocha této necelistvosti je $0,6 \text{ mm}^2$, což je $8,5 \%$ původní plochy díry



Obr. 36 Vzorek 4.4

U vzorku 4, který po napěchování s poměrnou výškovou deformací $\varepsilon_h = 76,8 \%$ a stupněm napěchování $P = 4,55$ došlo v ose vzorku k uzavření necelistvosti, jak můžeme vidět na obr. 36.

9. Závěr:

V této diplomové práci jsem v teoretické části provedl literární rešerši ohledně technologie výroby velkorozměrných desek. Objasnil jsem možné způsoby výroby těchto desek v rámci technologie volného kování. V experimentální části jsem pomocí programu pro měření vzdáleností a ploch v obraze změřil plochu jednotlivých necelistvostí mikrostruktur. Dále jsem provedl analýzu napěchovaných vzorků s příčně vyvrtanými dírami, které se lišily poměrnou výškovou deformací, stupněm napěchování a použitou technologií pěchování. Jeden ze vzorků byl pěchován pomocí klasické technologie za použití rovných pěchovacích desek. Druhý ze vzorků byl pěchován pomocí nové technologie za použití vypuklých pěchovacích desek a poté dopěchován pomocí rovných pěchovacích desek. Jak je patrné z uvedených výsledků, má nová technologie lepší vliv na uzavírání necelistvostí a prokování oproti klasické technologii s použitím rovných pěchovacích desek.

Literatura:

- [1] GREGER, M.: Rozbor technologie kování velkých kruhových desek. Kovářenství. 2013, č. 48.
- [2] JÍLEK, L., GREGER M.: Technologie kování velkých desek. Kovářenství. 2012, č. 44.
- [3] GREGER, M., PETRŽELA, J., JÍLEK, L.: Kování kruhových desek pro díly jaderných elektráren. Kovářenství. 2009, č. 36.
- [4] TANAKA, Y., SATO, I. 2011. Development of high purity large forgings for nuclear power plants. Journal of Nuclear Materials. (417).
- [5] PADERNI, A., LISSIGNOLI, A., BETTONI, V. et al. Large ESR forging ingots and their quality in production. 2nd International Conference ICRF 2014 - Milano/Italy, 7-9 May 2014
- [6] SATO, J., IWANAGA, K., TOMIOKA, A. et al. High-quality work roll manufacturing technology using new electro slag remelting (ESR). Kobelco Technology Review, 2011, No. 30
- [7] SINCZAK, J., MAJTA, J., GLOWACKI, M. et al. Prediction of mechanical properties of heavy forgings. J. Materials Processing Technology, 1998, Vol. 80-81
- [8] GREGER, M., PETRŽELA, J., LASZLÓ, V.: Kovářenské ingoty a jakost volných výkovků. In: Iron and steelmaking : XXIV. International scientific conference : Hotel Duo, Horní Bečva, Česká republika, 22. - 24. 10. 2014. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2014, s. 83-88.
- [9] BANASZEK, G., STEFANIK, A.: Theoretical and laboratory modelling of the closure of metallurgical defects during forming of a forging. J. Materials processing Technology, 2006, Vol. 177
- [10] SUZUKI, K., SATO, I., TSUKADA, H. 1994. Manufacturing and material properties of ultralarge size forgings for advanced BWRPV. Nuclear Engineering and Design. (151).
- [11] Způsob výroby kruhových desek, zejména velkorozměrných [patent]. Patentový spis, CS 277096 B6. Uděleno 30. 9 1992.
- [12] Způsob kování velkorozměrných kruhových desek [patent]. Popis vynálezu k autorskému osvědčení, 171848. Uděleno 15. 3. 1978

- [13] Způsob kování rozměrných kruhových desek [patent]. Popis vynálezu k autorskému osvědčení, 227477. Uděleno 15. 4. 1986.
- [14] Způsob výroby tlustostěnných kruhových kovových desek volným kováním [patent]. Popis vynálezu k autorskému osvědčení, 223036. Uděleno 15. 3. 1986.
- [15] GREGER, M., PETRŽELA, J., LASZLÓ, V., MAŠEK V.: Vliv postupu kování na uzavírání osových necelistvostí ve výkovku. Kovářství. 2013, č. 47.
- [16] GREGER, M., JUHAS, M.: Stanovení základních rozměrů předkovků pro volné výkovky. Kovářství. 2013, č. 48.
- [17] GREGER, M.: Kování trubkovnic, kotoučů a desek: TAČR TZA 04010705 [TAČR TZA 04010705]. 2014.
- [18] Tepelné zpracování velkých výkovků ve VHM [TAČR TA 04010705]. 2014
- [19] KEPKA, M.: Ovlivňování čistoty oceli. Praha: Academia, 1986, 154 s.
- [20] SOMMER, B.: Technologie kování. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1965, 200 s.
- [21] JÍLEK, L.: 1988. Pokroky v technologii volného kování. In: Hutnické listy b. Dobrá: Výzkumný ústav hutnictví železa, s. 3-51.
- [22] ŠMRHA, L.: Tuhnutí a krystalizace ocelových ingotů. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1983, 305 s.
- [23] BHADESHIA, H.K.D.H. 2012. Steels for bearings. Progress in Materials Science. (57).
- [24] MITTNER, O. MEROVO - program pro měření ploch a vzdáleností v obraze. 2010. Dostupné z: www.urel.feec.vutbr.cz/web_documents/software/2010/MI-2010.exe